

素粒子特論

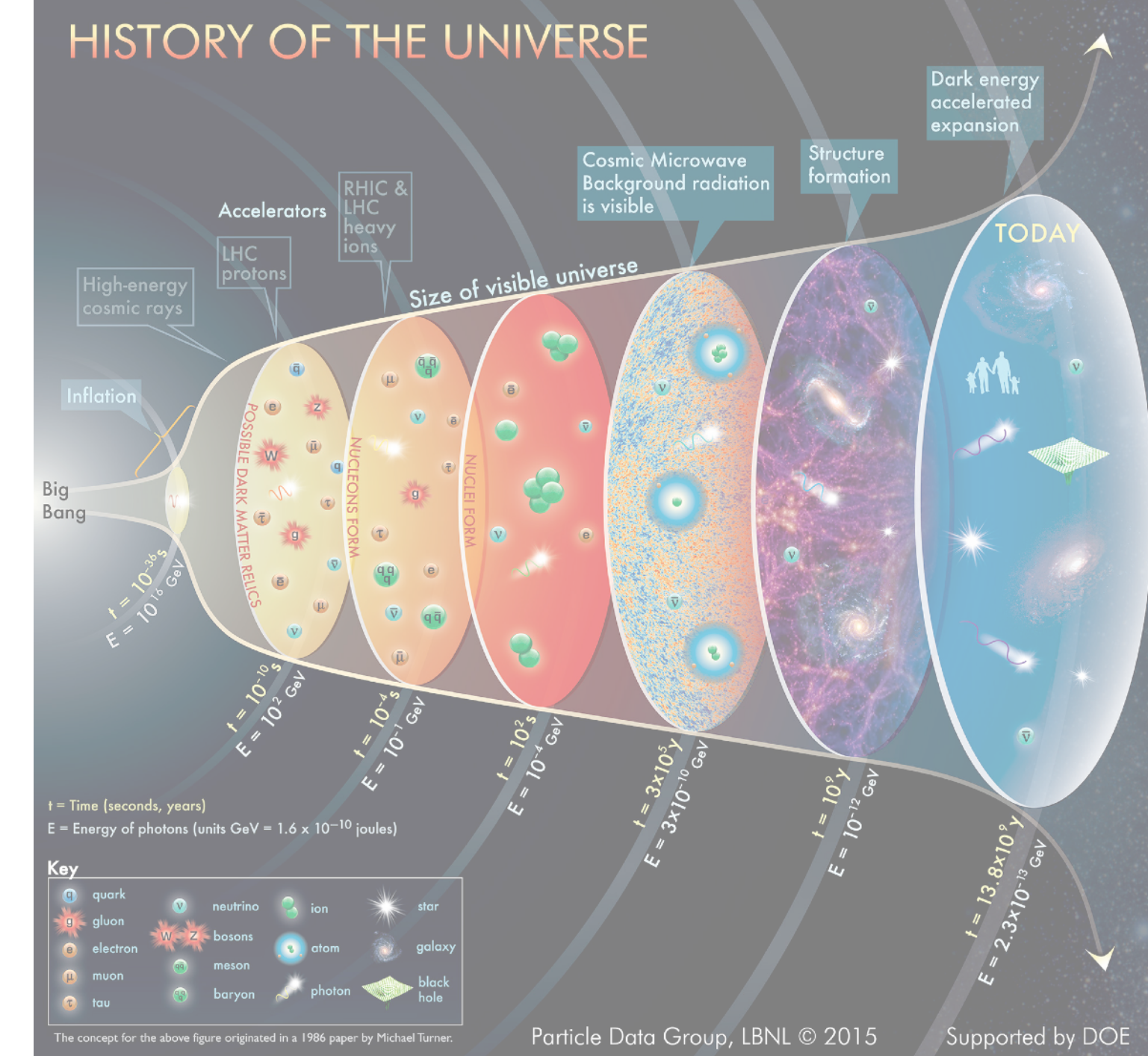


Figure credit;
Particle Data Group
at Lawrence Berkeley National Lab.

浜口幸一 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻)

@お茶の水女子大学, 2023年夏学期

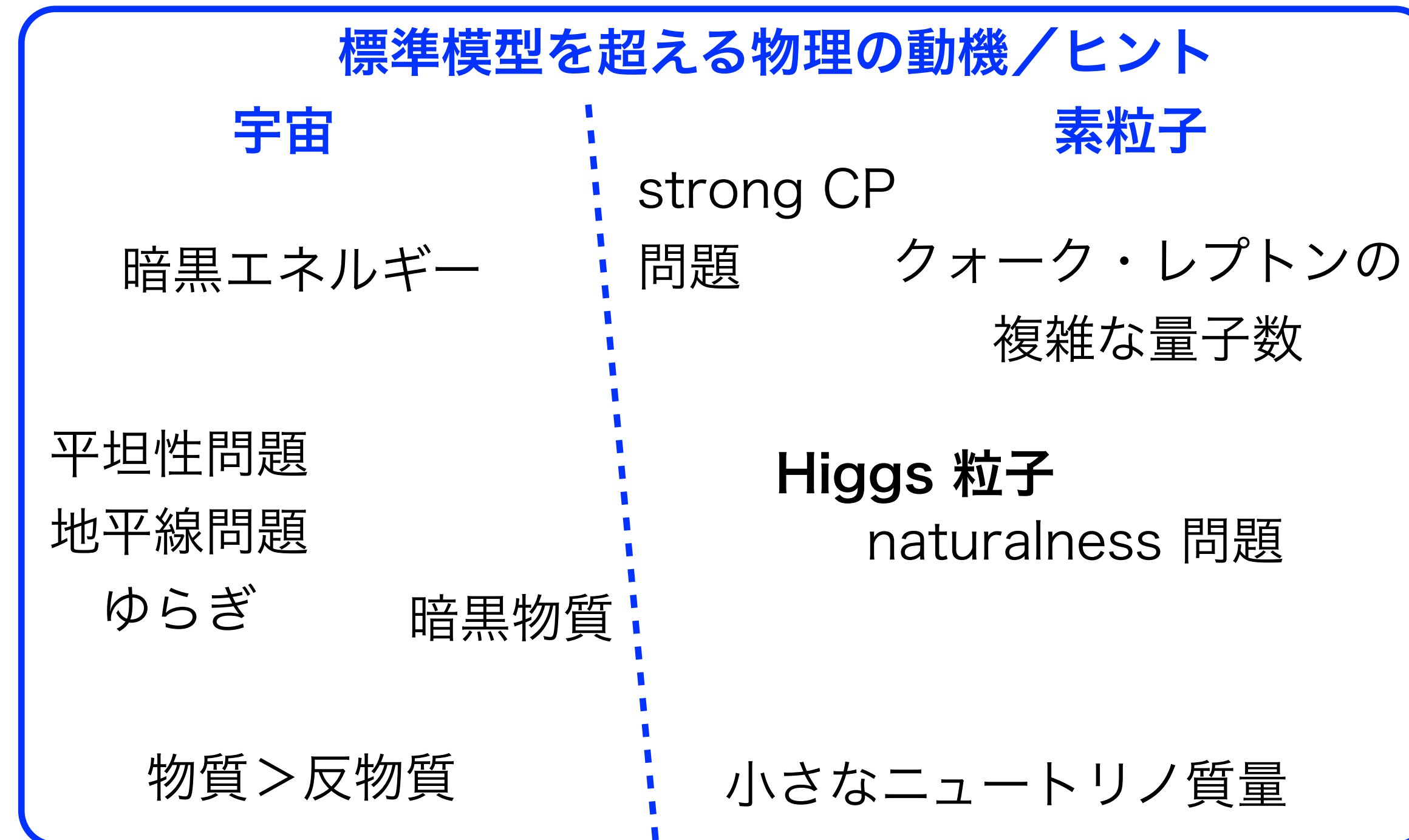
シラバス より

主題と目標
主に素粒子物理の理論的側面について解説する。素粒子標準模型の構成およびその問題点について解説し、それぞれの問題点に対する「標準模型を超える物理」の候補をいくつか紹介する。
授業計画
全15回の講義で扱う内容は以下のとおりである。ただし履修者の構成や授業の進み方に応じて適宜変更する場合がある。 第一部：（スライドを用いて講義全体の内容を概観する。1～2コマ程度。） ・素粒子の標準模型を超える物理 第二部：（黒板を用いて各論の解説を行う。質問や要望に応じて適宜順番を入れ替えることがある。） ・素粒子の標準模型 ・大統一理論 ・ニュートリノ質量とシーソー機構 ・標準宇宙論入門 ・インフレーション ・宇宙の物質反物質非対称性とバリオジェネシス／レプトジェネシス ・暗黒物質 ・strong CP問題とアクシオン ・超対称性模型
時間外学習
授業中によく理解できなかったところは復習しましょう。授業時間外の質問も歓迎します。
学生へのメッセージ
授業中や授業後の質問やコメント大歓迎です。「標準模型を超える物理」は様々な候補がありますので、授業計画に入っていない内容についても興味があれば是非議論しましょう。

2部構成

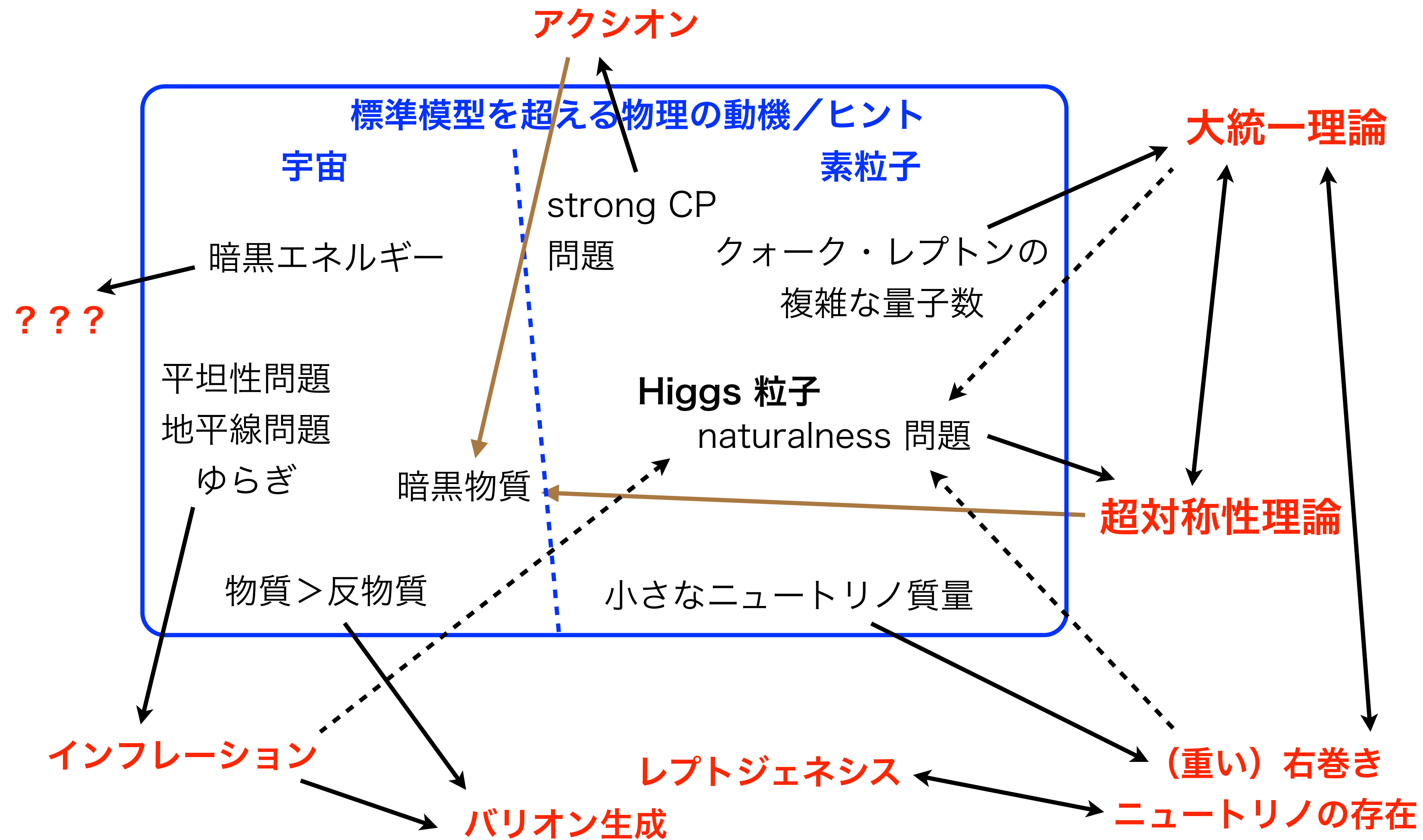
途中でどんどん質問して下さい！

第1部

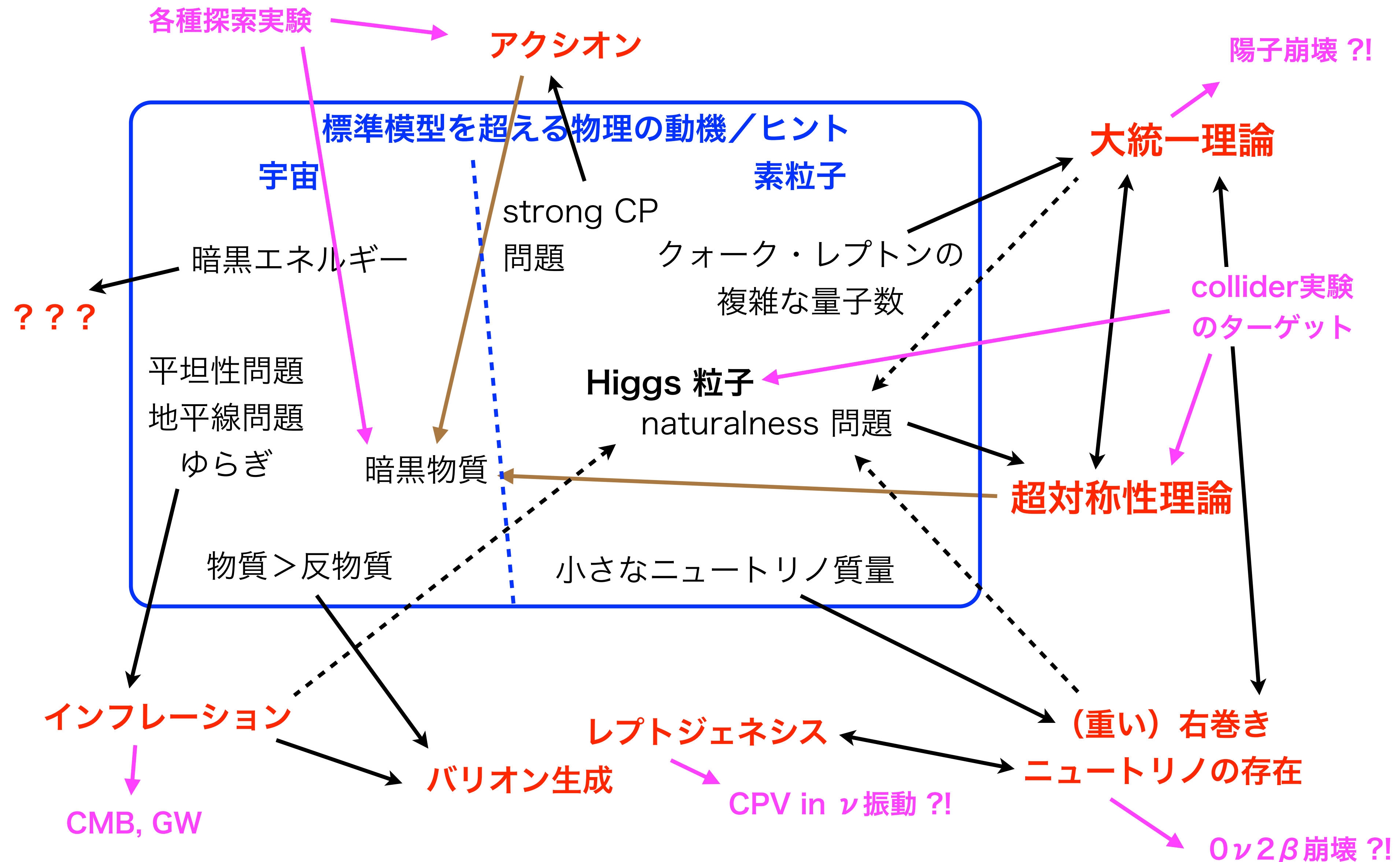


具体的には、こんな↑イメージ図
を埋めながら話を進めようと思います

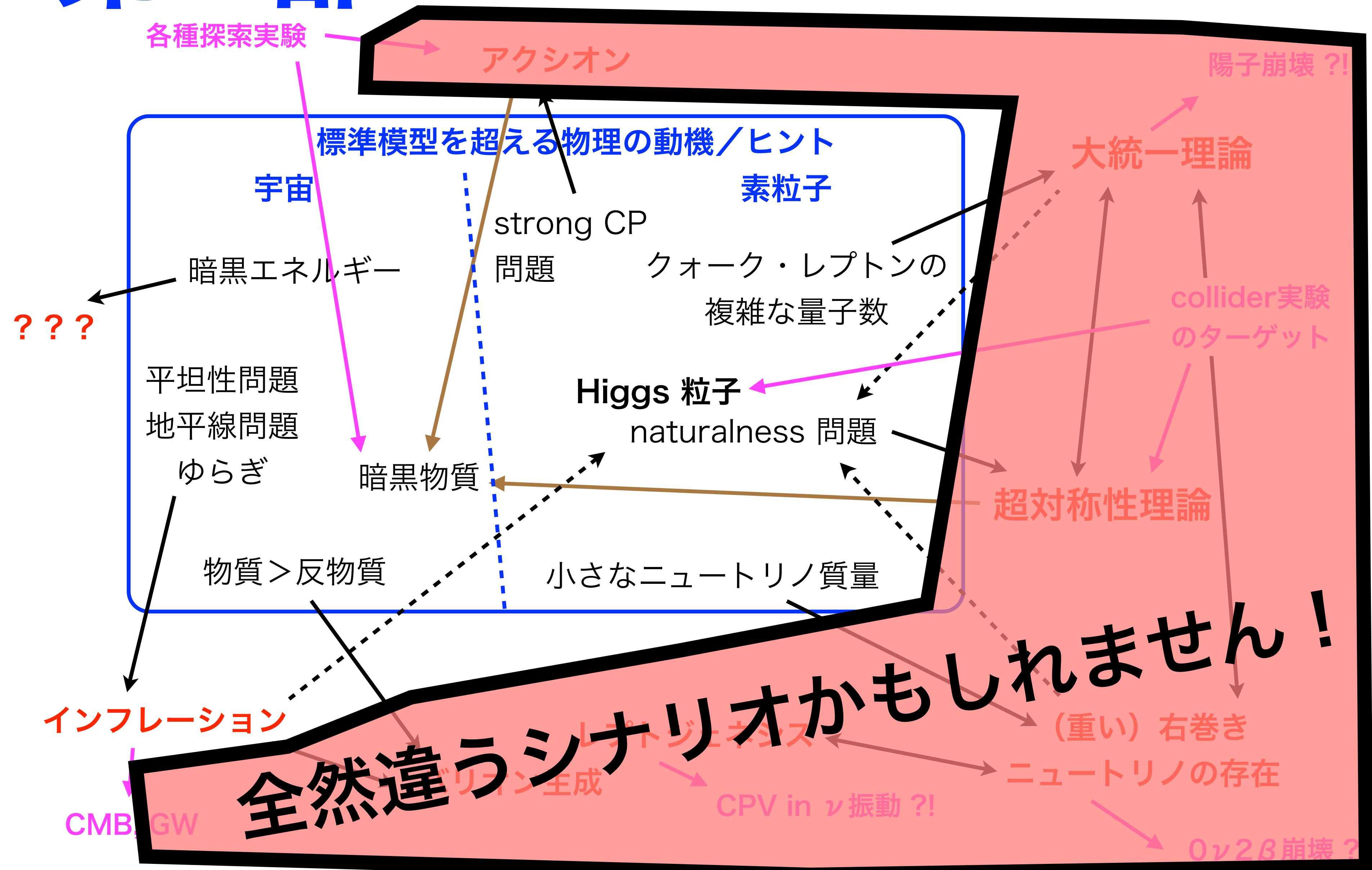
第1部



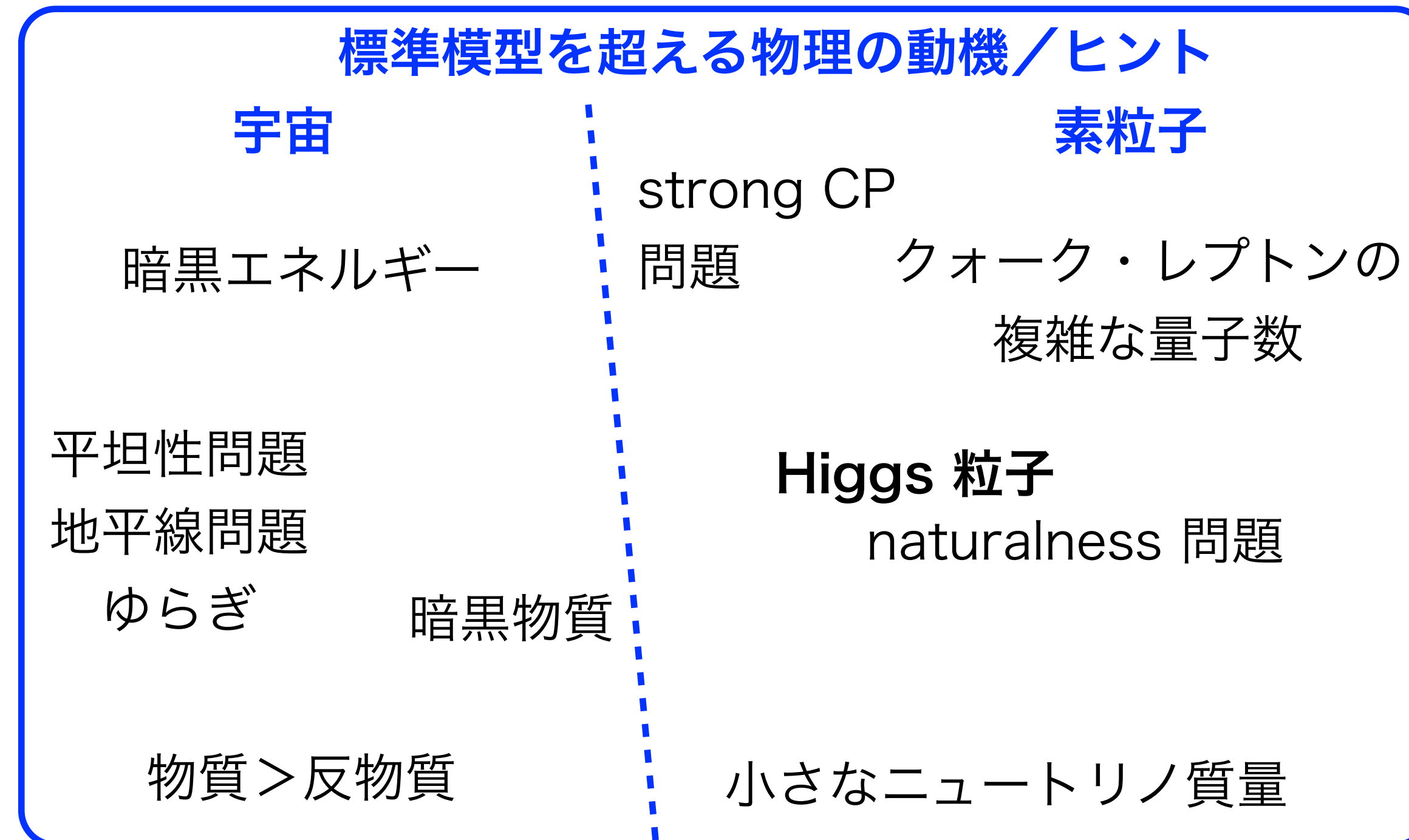
第1部



第1部



第1部



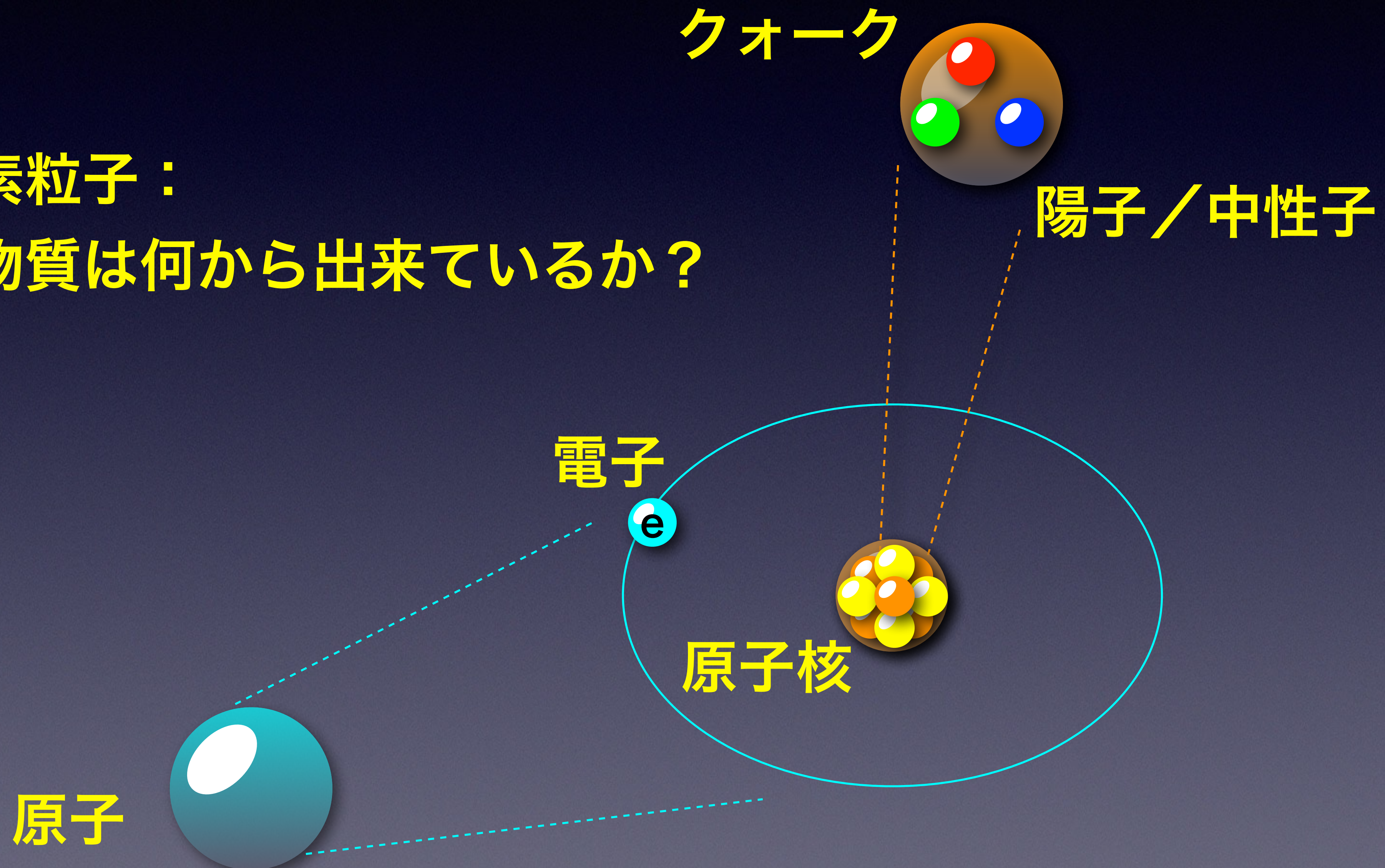
さて、どこから始めましょう？

◆ まず標準模型

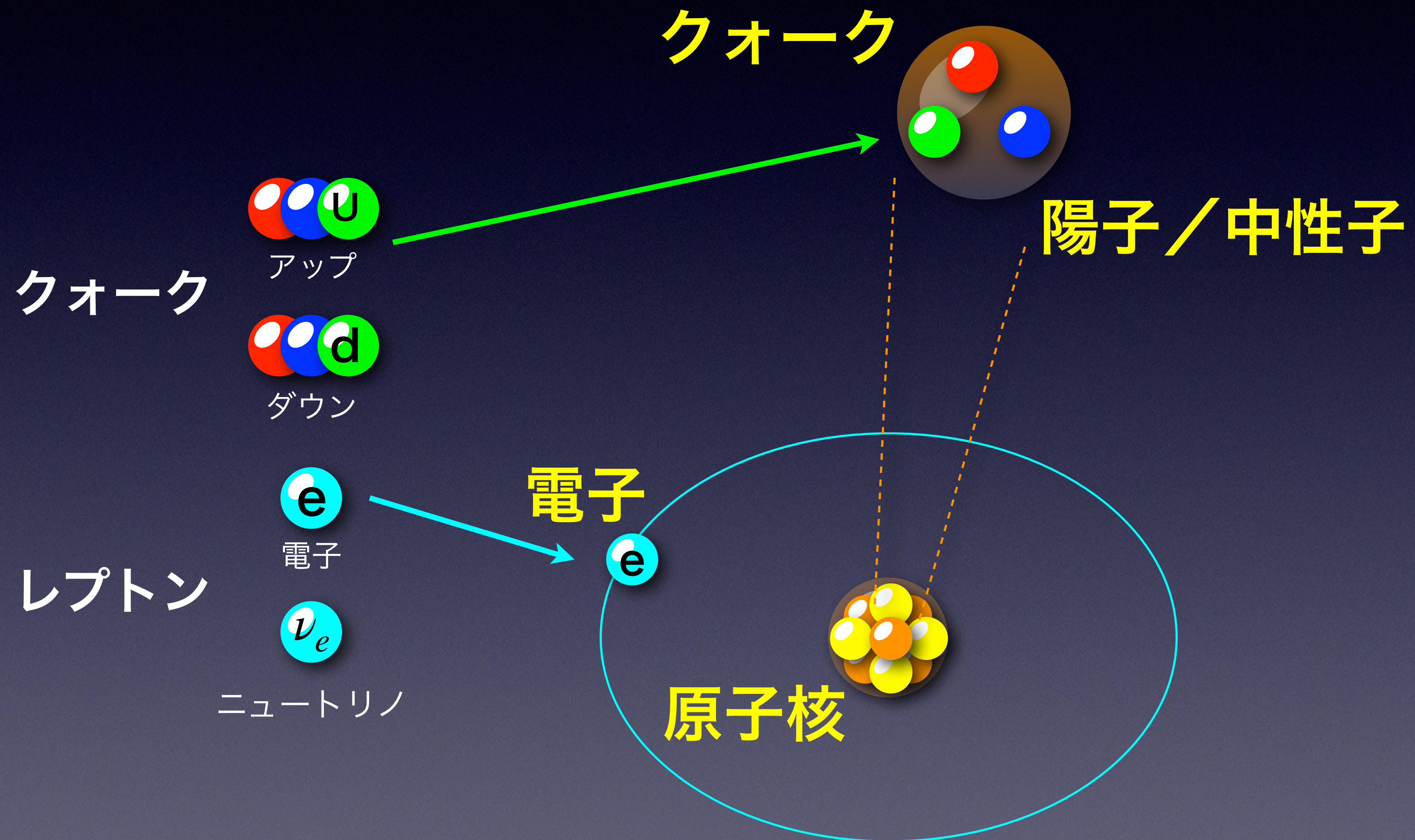
まずは標準模型から

素粒子：

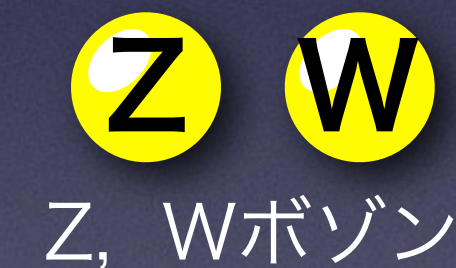
物質は何から出来ているか？



まずは標準模型から



まずは標準模型から



ゲージ粒子
(力を伝える粒子)



現在までに確立している素粒子理論 = 「標準模型」

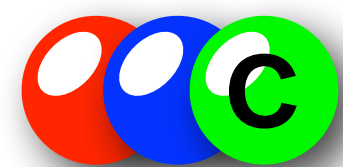
素粒子の 重さ比べ

第1世代 第2世代 第3世代

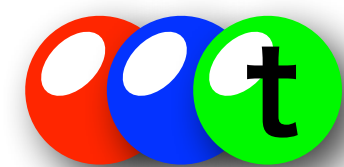
クォーク



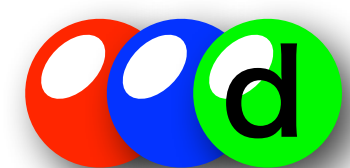
アップ



チャーム



トップ



ダウン



ストレンジ



ボトム

レプトン



電子



ミューオン



タウ



eニュートリノ



μニュートリノ



τニュートリノ



グルーオン



光子



W, Zボゾン

ゲージ粒子
(力を伝える粒子)



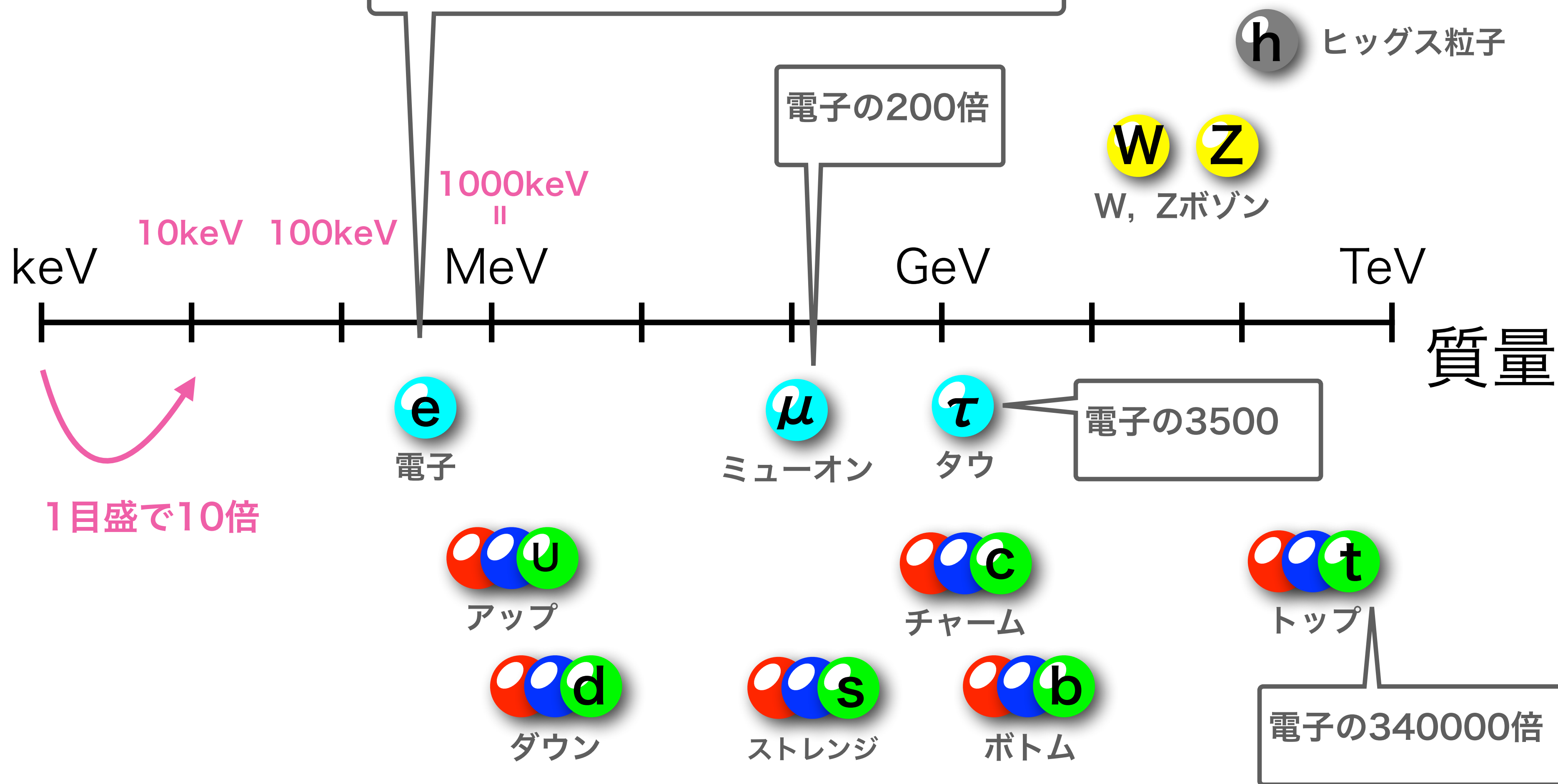
ヒッグス粒子

素粒子の 重さ比べ

電子の質量は

$$511 \text{ keV} \simeq 0.9 \times 10^{-28} \text{ g}$$

$$= 0.000000000000000000000000000000009 \text{ g}$$



はいはいはい！
この「力を伝える粒子」ってのは何？

クォーク
d
ダウ
s
ストレンジ
b
ボトム

レプトン
e
電子
 μ
ミューオン
 ν_e
eニュートリノ
 ν_μ
 μ ニュートリノ
 ν_τ
 τ ニュートリノ

えーっと

g
グルーオン

γ
光子

Z
Zボゾン

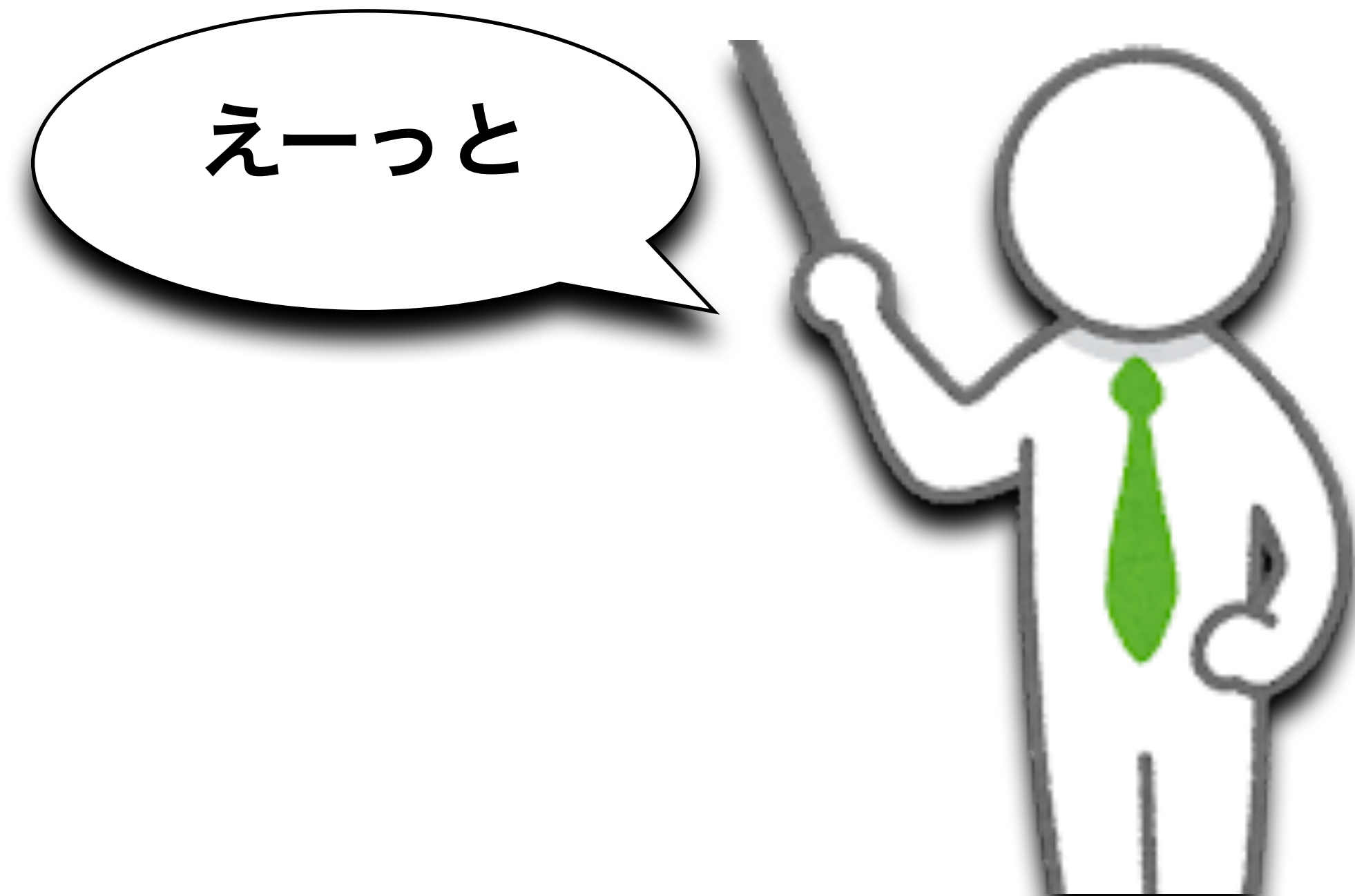
h
ヒッグス

ゲージ粒子
(力を伝える粒子)

現在までに確立している素粒子理論 = 「標準模

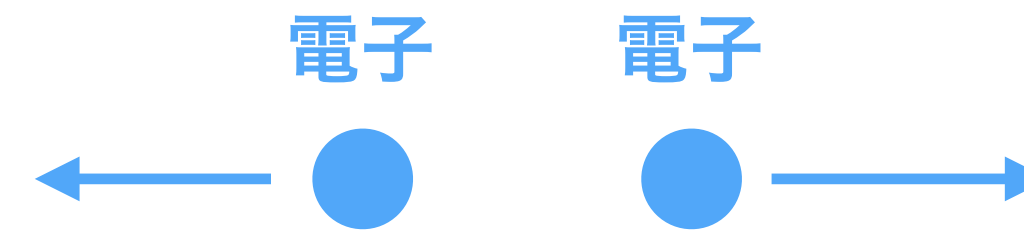
素粒子にはたらく相互作用（力）

- ・電磁相互作用（電磁気力）
- ・弱い相互作用（弱い力）
- ・強い相互作用（強い力）
- ・重力相互作用（重力）



素粒子にはたらく相互作用（力）

- ・電磁相互作用（電磁気力）



例えば、マイナスどうしは反発

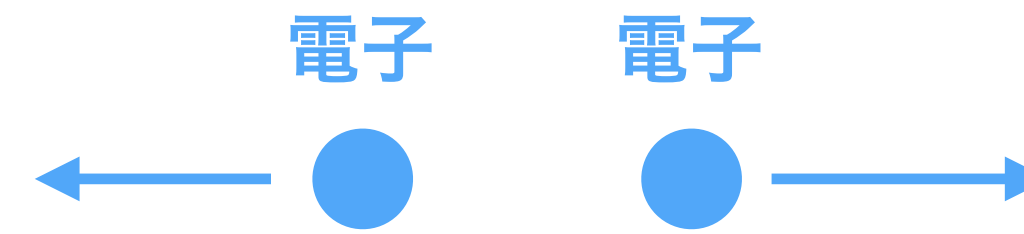
- ・弱い相互作用（弱い力）

- ・強い相互作用（強い力）

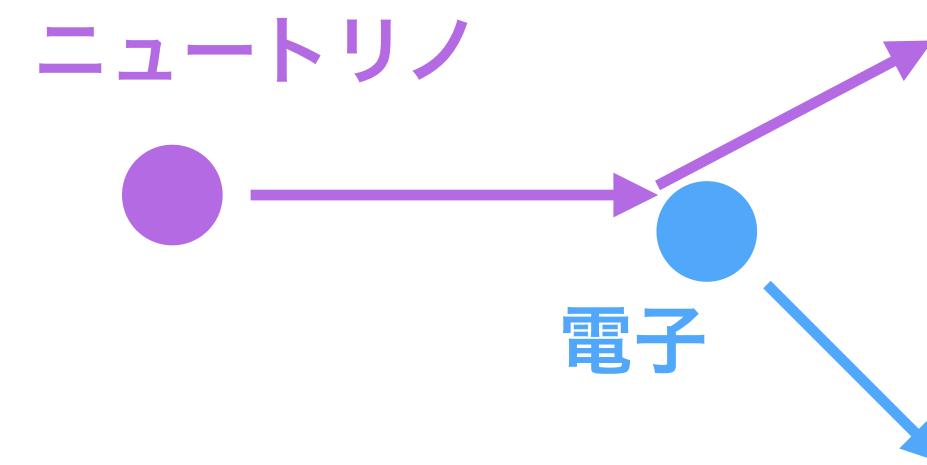
- ・重力相互作用（重力）

素粒子にはたらく相互作用（力）

- ・電磁相互作用（電磁気力）



- ・弱い相互作用（弱い力）

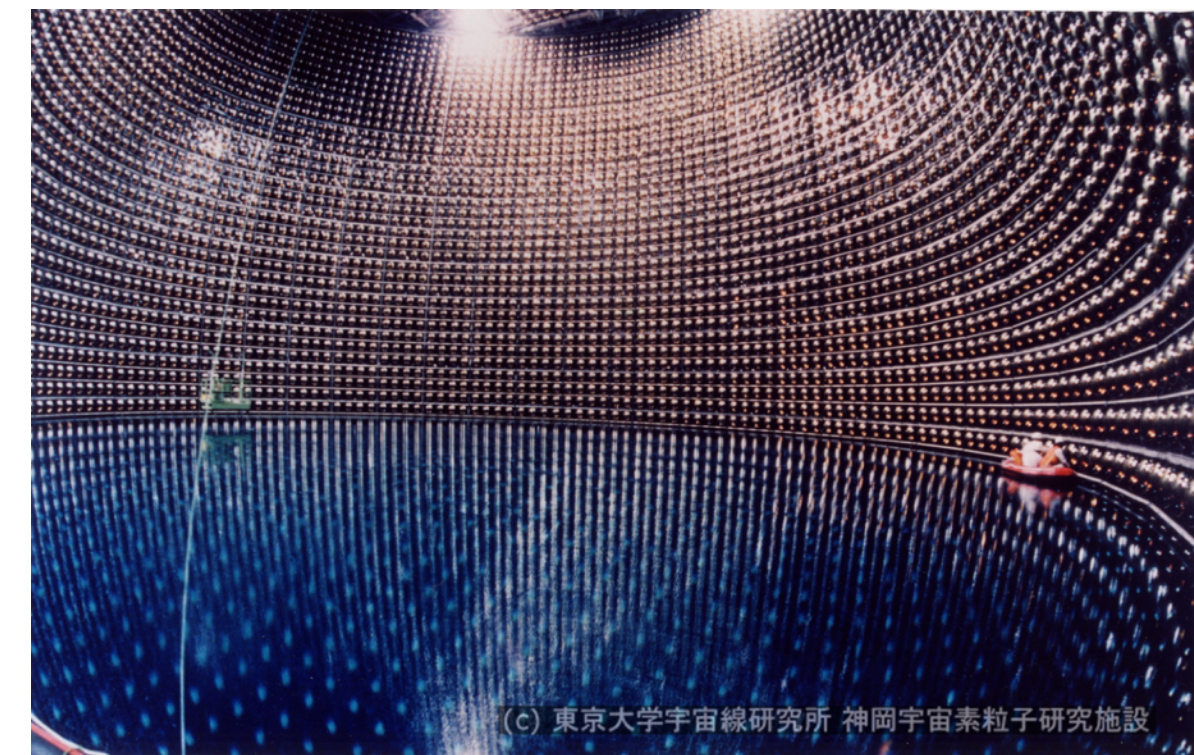


ニュートリノは電荷を持っていないけど「弱い相互作用」によって電子を弾き飛ばせる。

- ・強い相互作用（強い力）

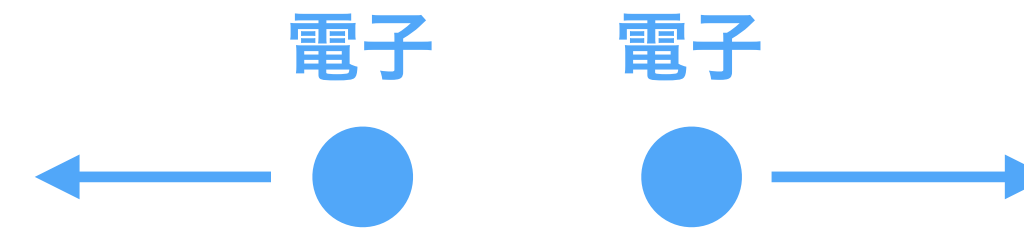
カミオカンデなどのニュートリノ実験は、この「弱い相互作用」による散乱を用いてニュートリノを検出している。

- ・重力相互作用（重力）

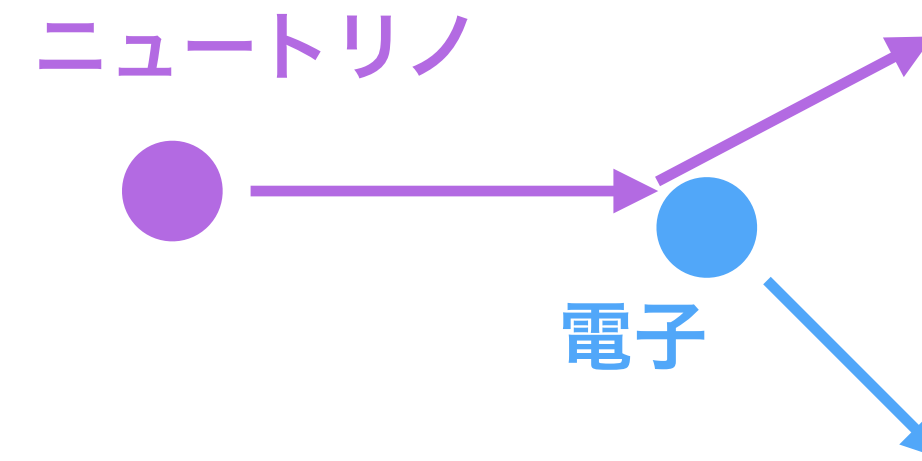


素粒子にはたらく相互作用（力）

- ・電磁相互作用（電磁気力）



- ・弱い相互作用（弱い力）



- ・強い相互作用（強い力）



原子核

陽子はプラスの電荷なのに
何故バラバラにならない？
-> 「強い力」でくっついている。



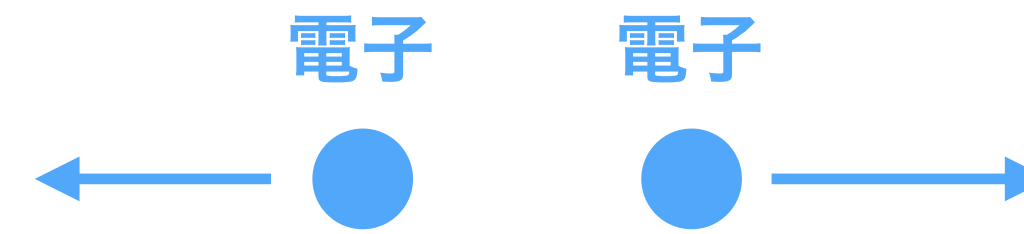
クォーク

クォークが陽子や中性子の中に
閉じ込められているのも「強い力」
（力が強すぎて外に出てこれない!）

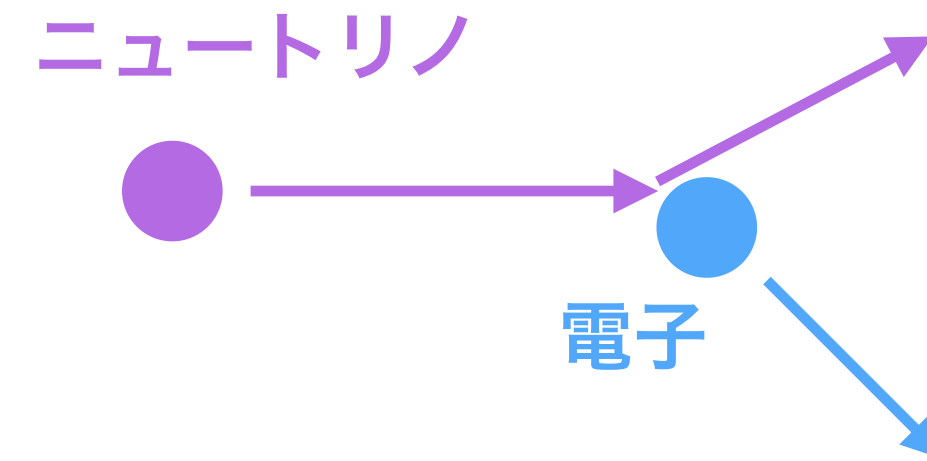
- ・重力相互作用（重力）

素粒子にはたらく相互作用（力）

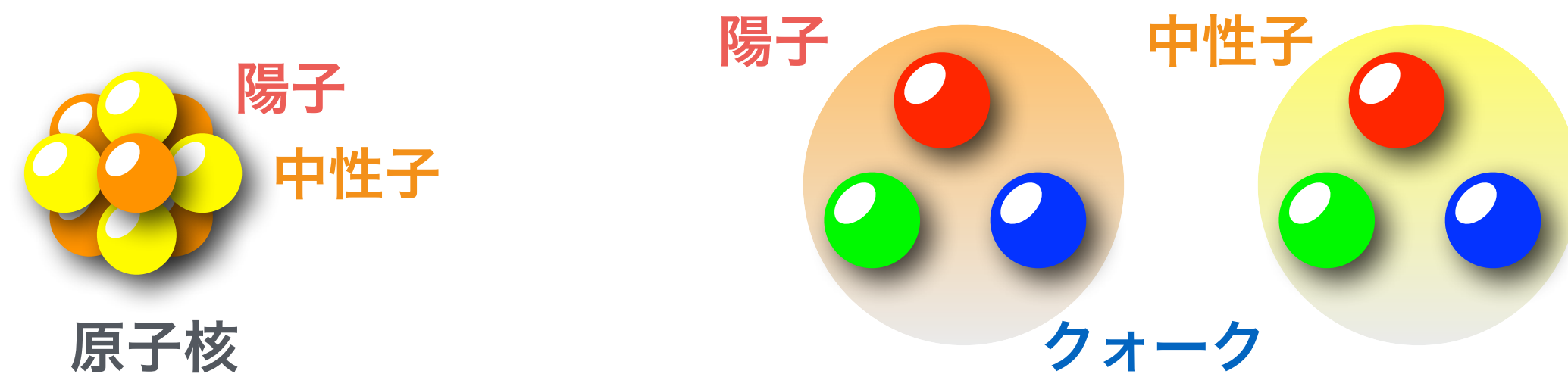
- ・電磁相互作用（電磁気力）



- ・弱い相互作用（弱い力）



- ・強い相互作用（強い力）



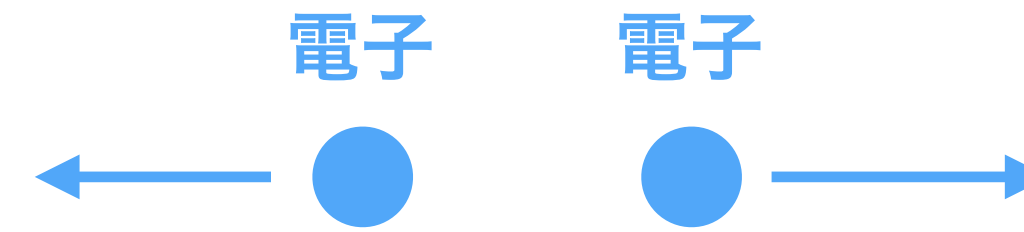
- ・重力相互作用（重力）



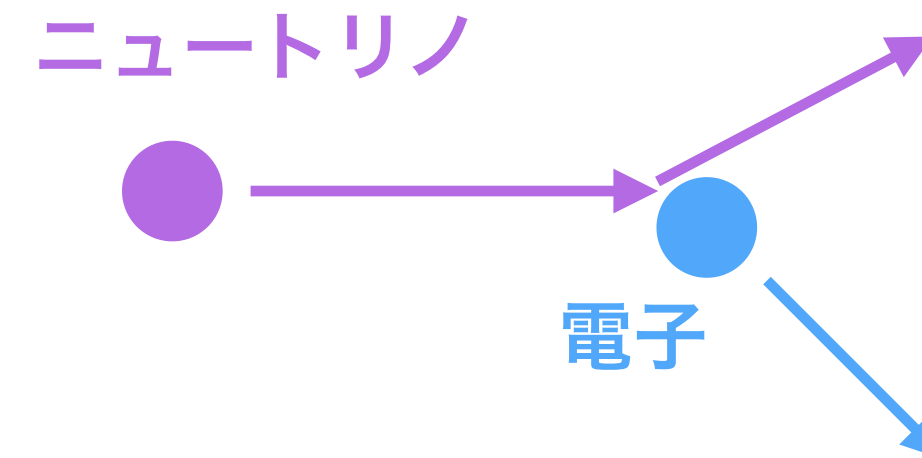
一番なじみのある力だと思いますが、
素粒子に働く力としては、とんでもなく弱い！

素粒子にはたらく相互作用（力）

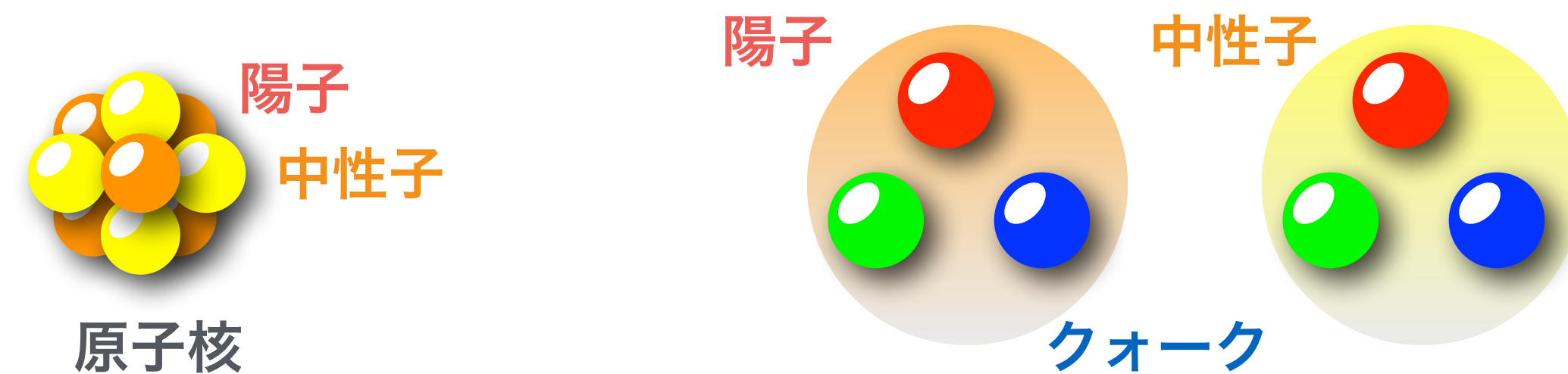
- ・電磁相互作用（電磁気力）



- ・弱い相互作用（弱い力）



- ・強い相互作用（強い力）



- ・重力相互作用（重力）

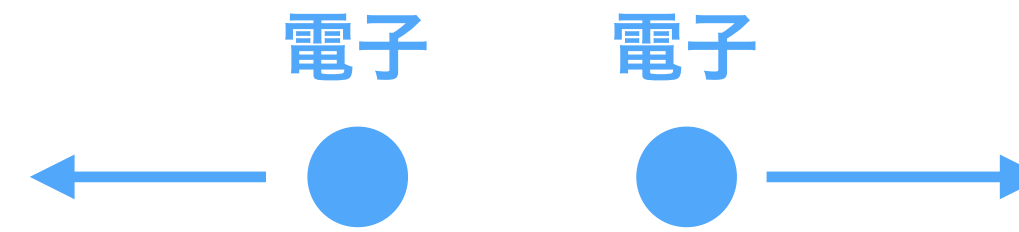


一番なじみのある力だと思いますが、
素粒子に働く力としては、とんでもなく弱い！

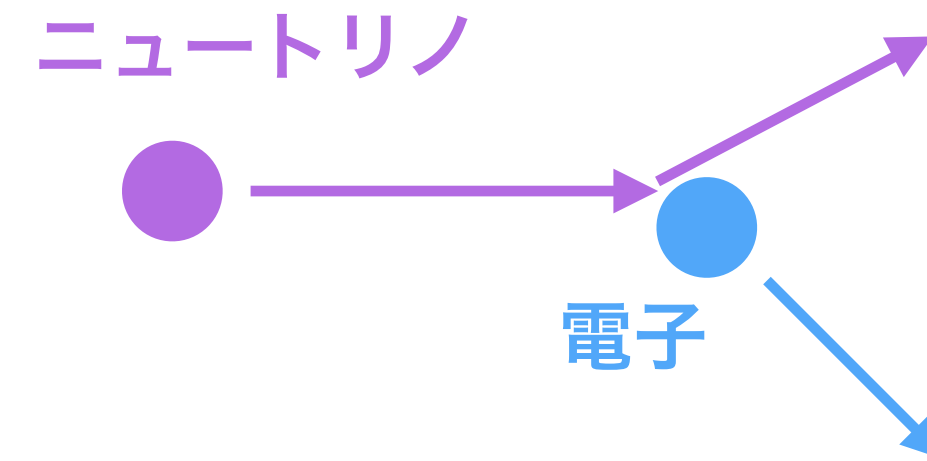
しかも、他の相互作用と違って量子論的な記述が未完。
(・・・この講義は重力の量子についてはこれ以上触れません・・・。)

素粒子にはたらく相互作用（力）

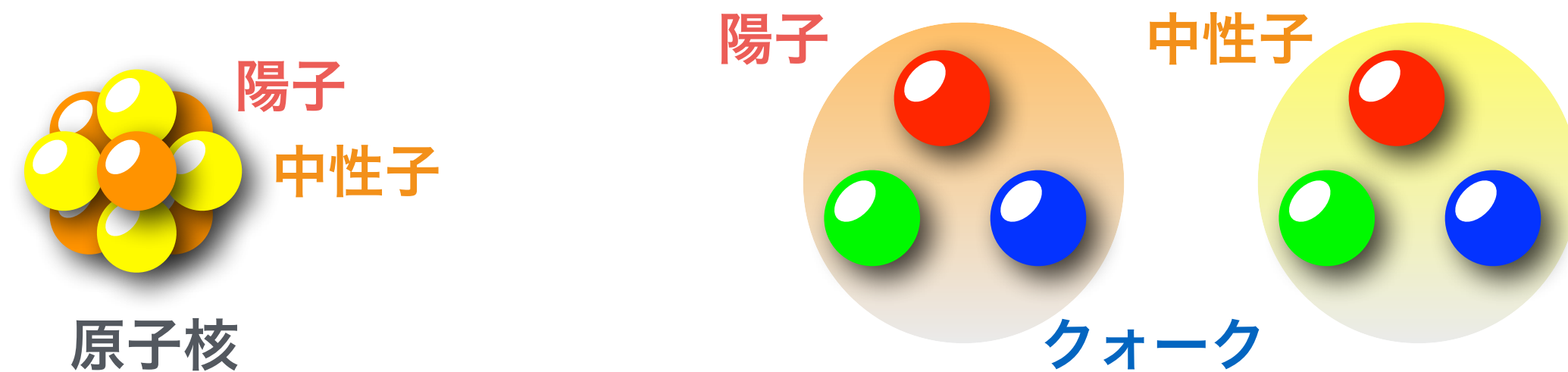
- ・電磁相互作用（電磁気力）



- ・弱い相互作用（弱い力）



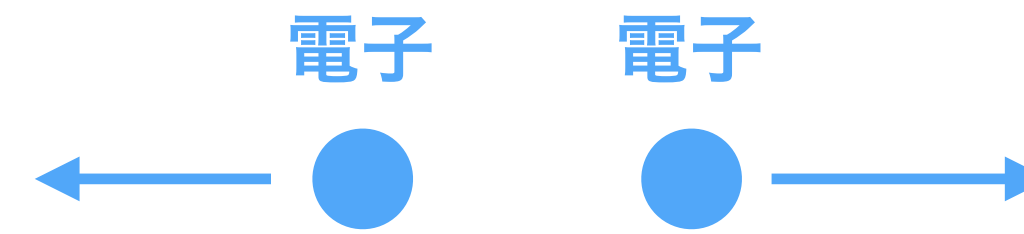
- ・強い相互作用（強い力）



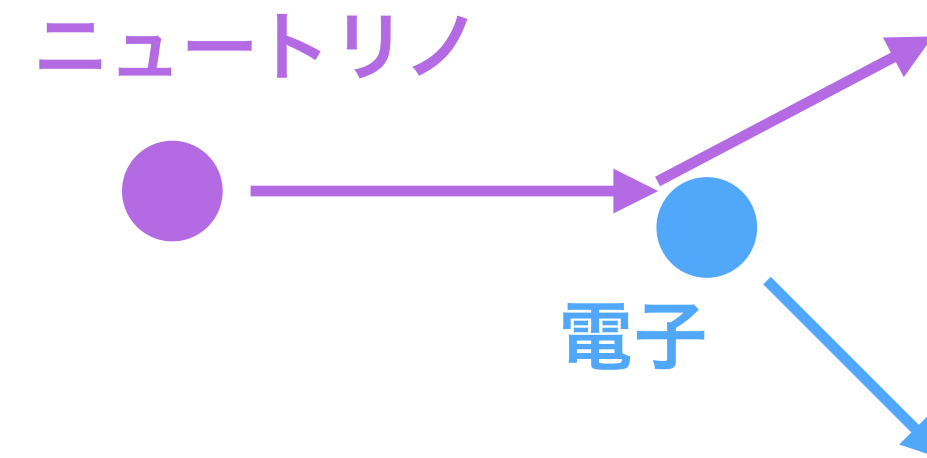
実は素粒子どうしの相互作用（力）も、素粒子によって媒介されている。

実は素粒子どうしの相互作用（力）も、素粒子によって媒介されている。

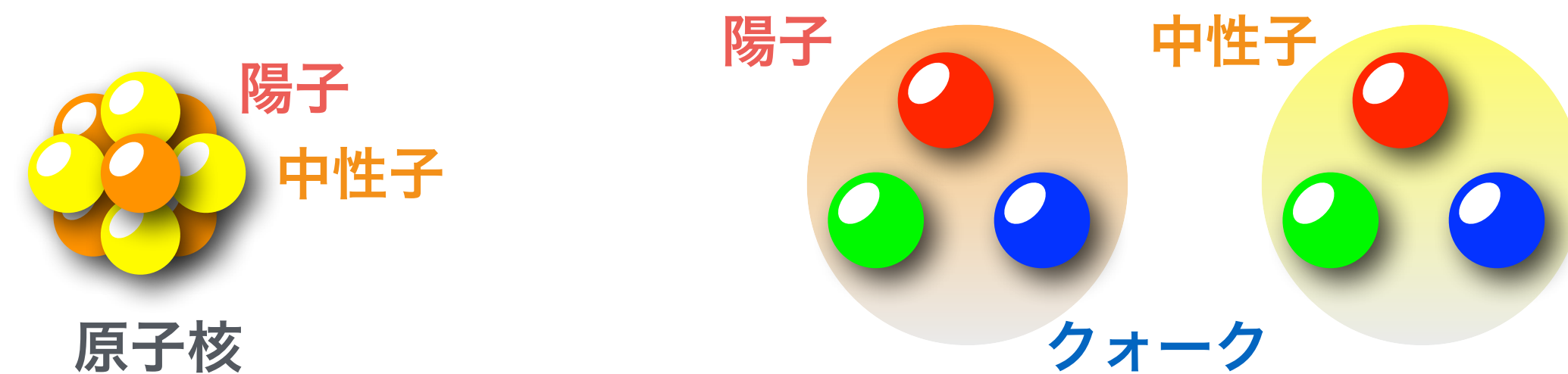
- ・電磁相互作用（電磁気力）



- ・弱い相互作用（弱い力）

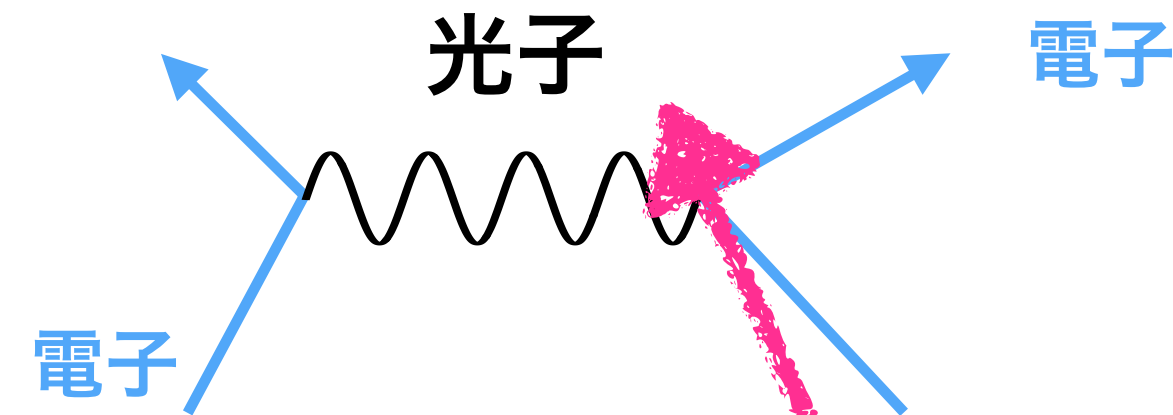


- ・強い相互作用（強い力）

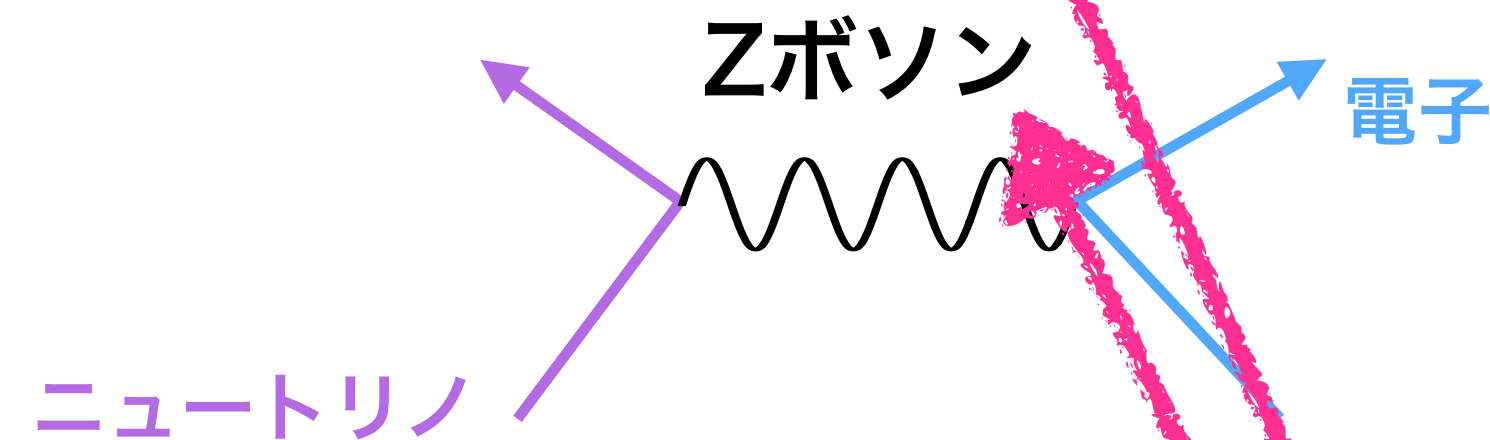


実は素粒子どうしの相互作用（力）も、素粒子によって媒介されている。

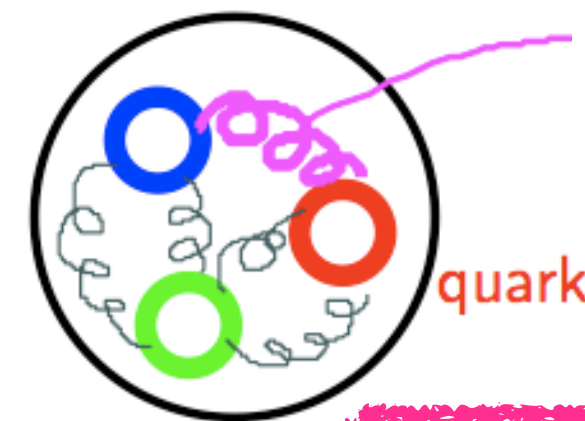
・電磁相互作用（電磁気力）



・弱い相互作用（弱い力）



・強い相互作用（強い力）



ゲージ粒子（ゲージボソン）

「3つの相互作用（力）」の正体は、
ゲージ粒子（ゲージボソン）が媒介する「ゲージ相互作用」。

第1世代

第2世代

第3世代

クォーク

アップ

チャーム

トップ

ダウン

ストレンジ

ボトム

グルーオン

光子

W, Zボゾン

ヒッグス

ゲージ粒子
(力を伝える粒子)

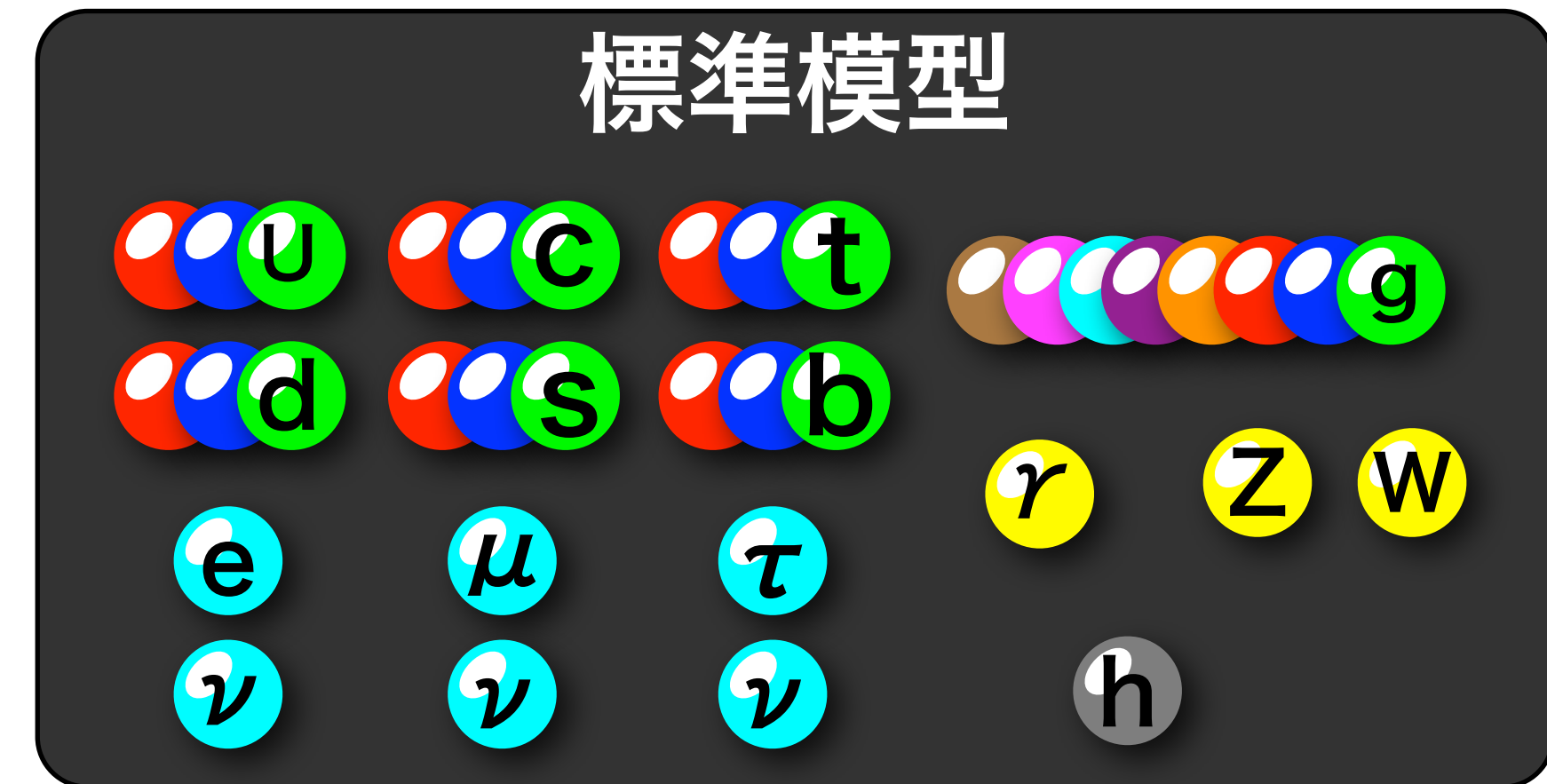
標準模

現在まで

・・・というわけです。

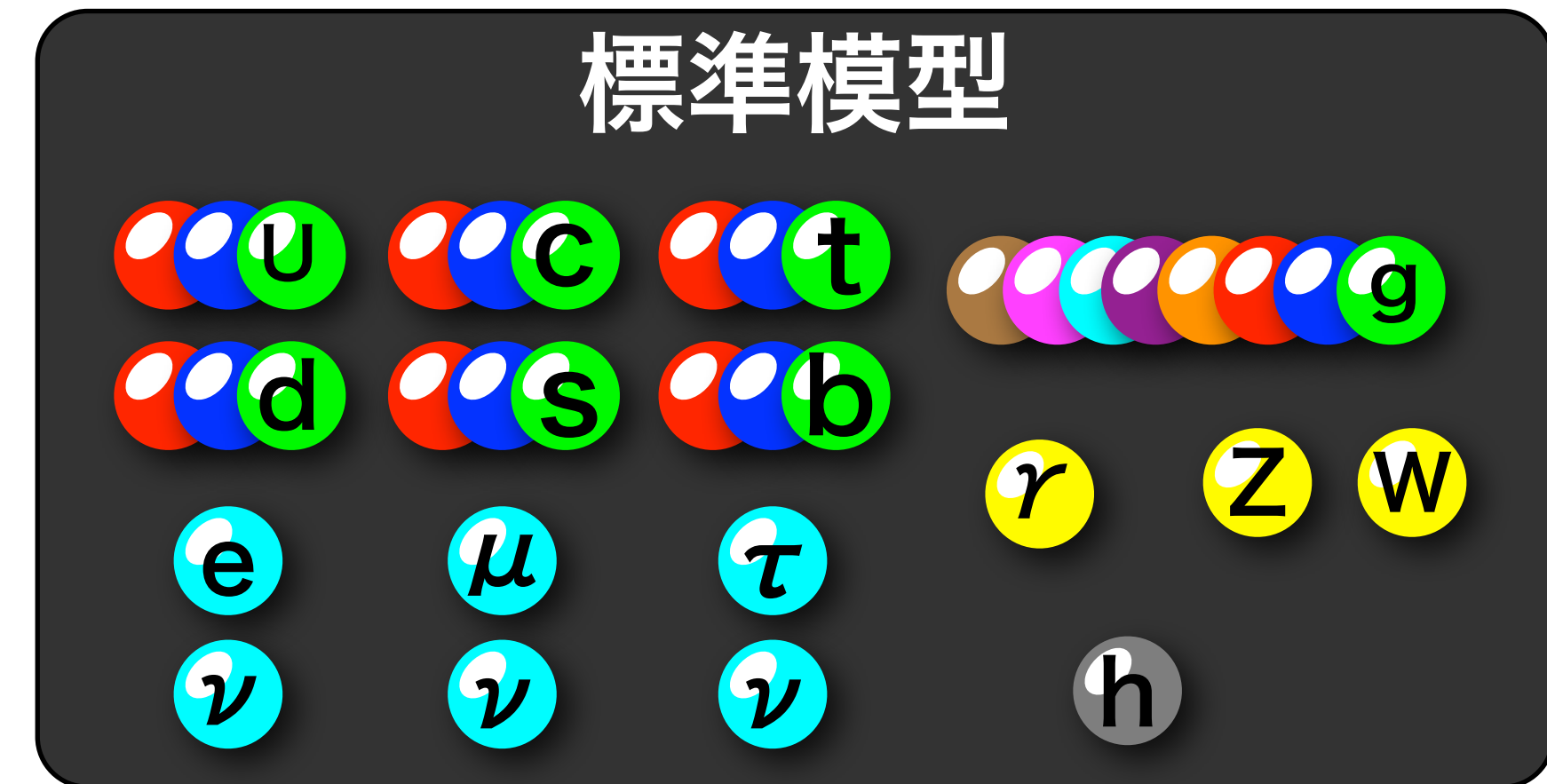
もうちょっとちゃんと記述しようとする「場の量子論」が必要になります。。。

標準模型



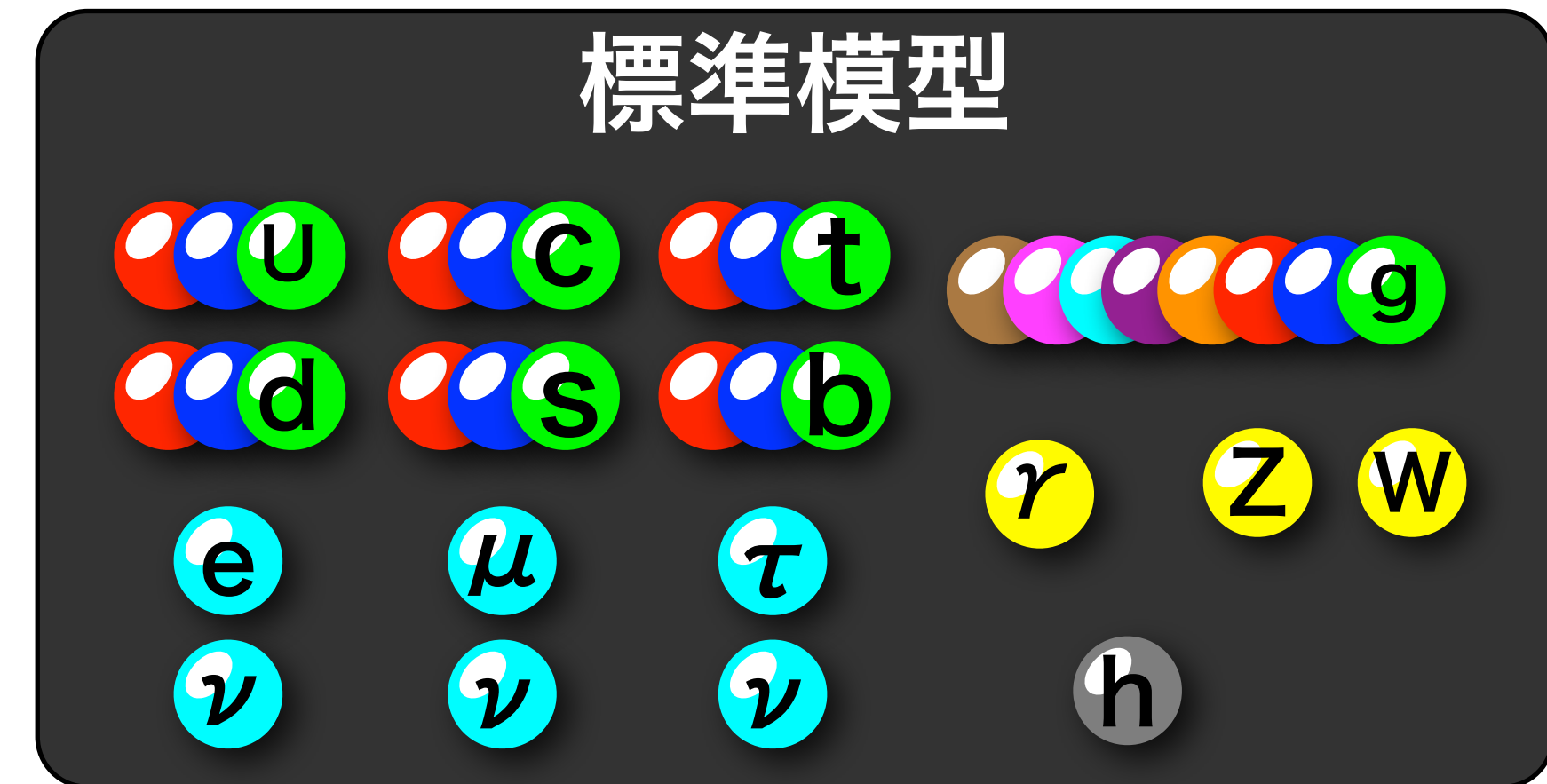
▶ 標準模型：「場の量子論」で記述されている。

標準模型



- ▶ 標準模型：「場の量子論」で記述されている。
- ▶ 場の量子論では「ラグランジアン」が素粒子の性質や素粒子の間に働く力を記述している。

標準模型

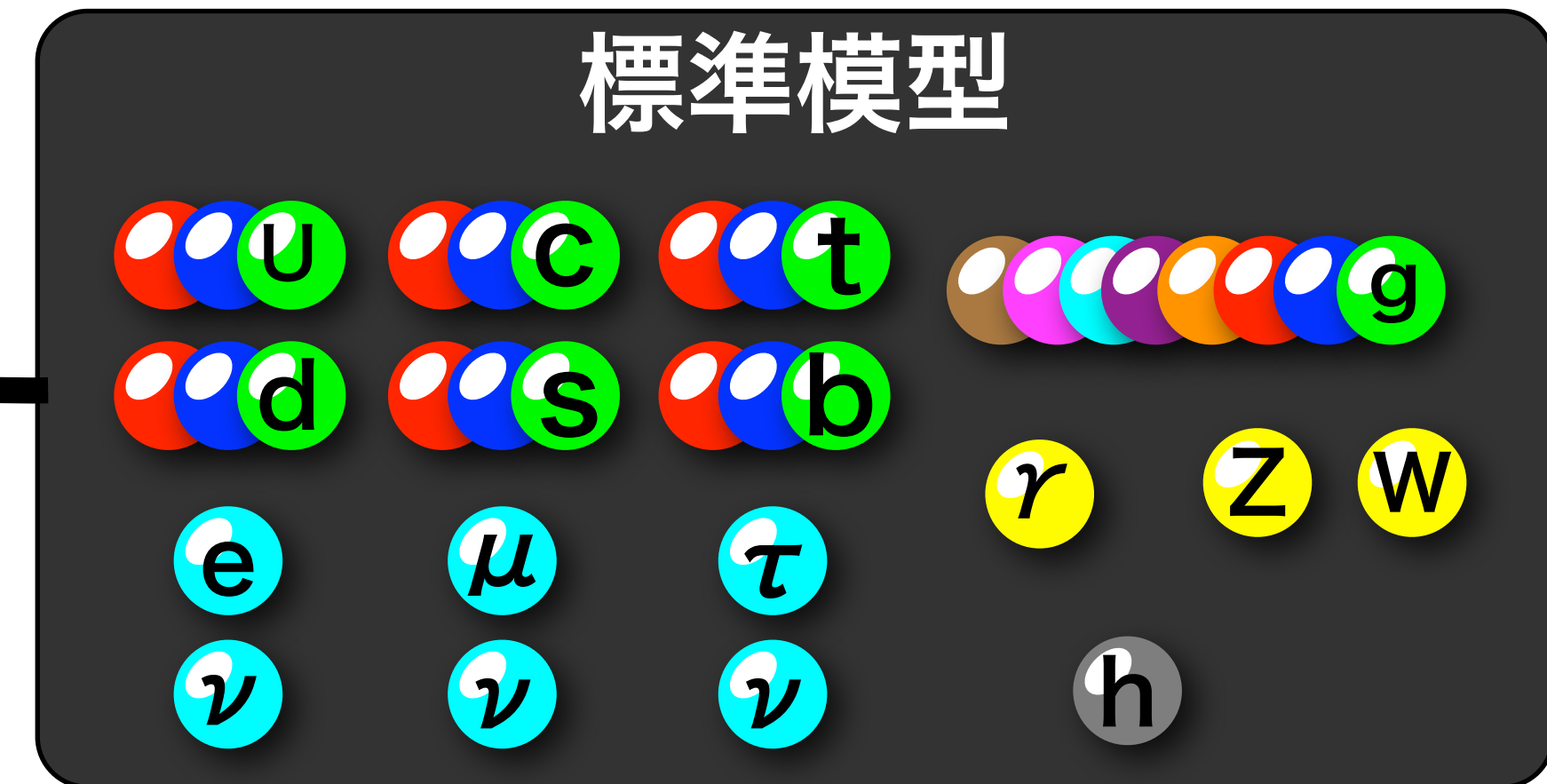


- ▶ 標準模型：「場の量子論」で記述されている。
- ▶ 場の量子論では「ラグランジアン」が素粒子の性質や素粒子の間に働く力を記述している。
- ▶ 例えば電子と光子の相互作用は・・・

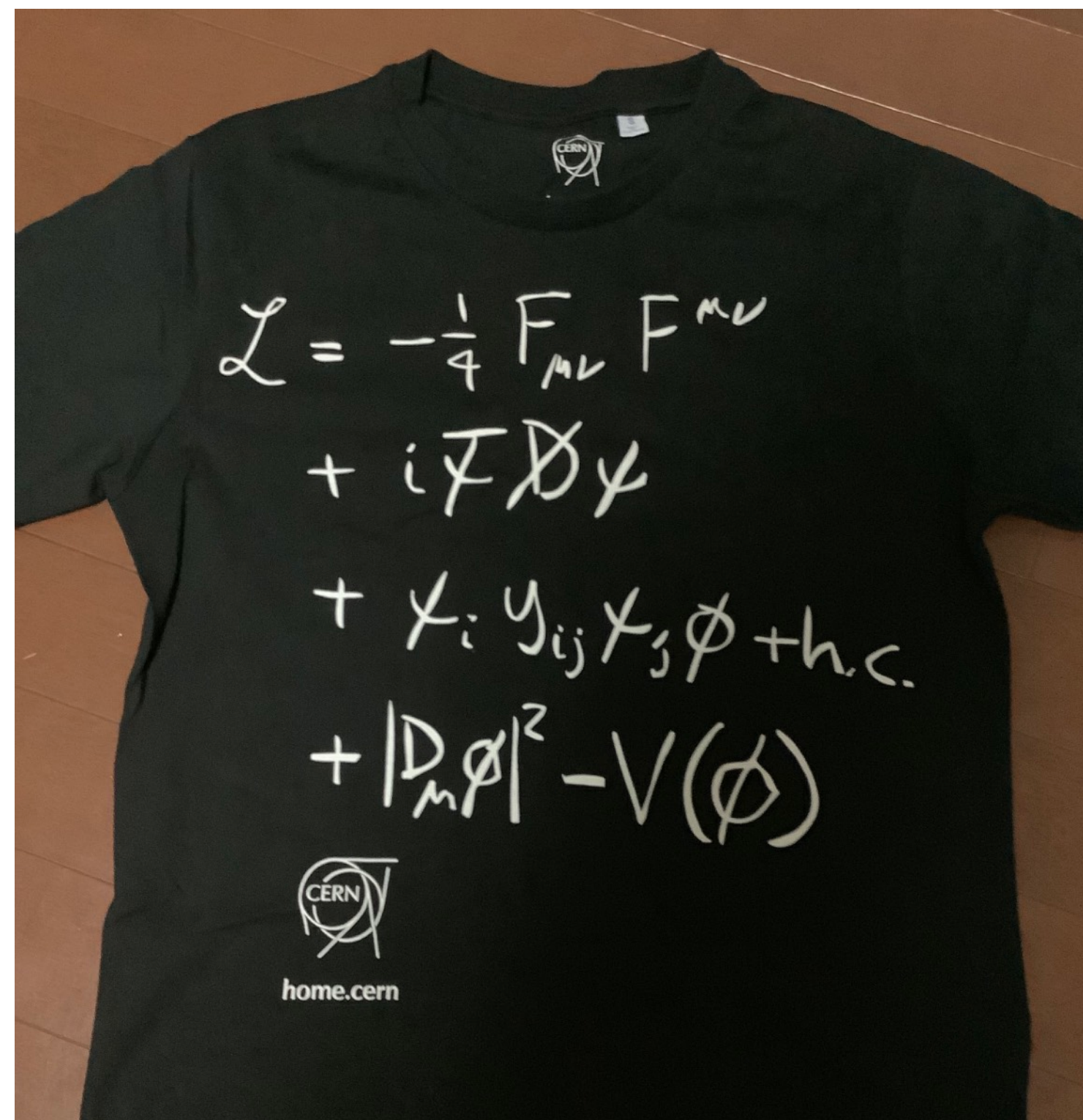
$$\mathcal{L} = e \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu$$

ラグランジアン 結合定数 電子(or 陽電子) 光子 光子 電子 e

標準模型

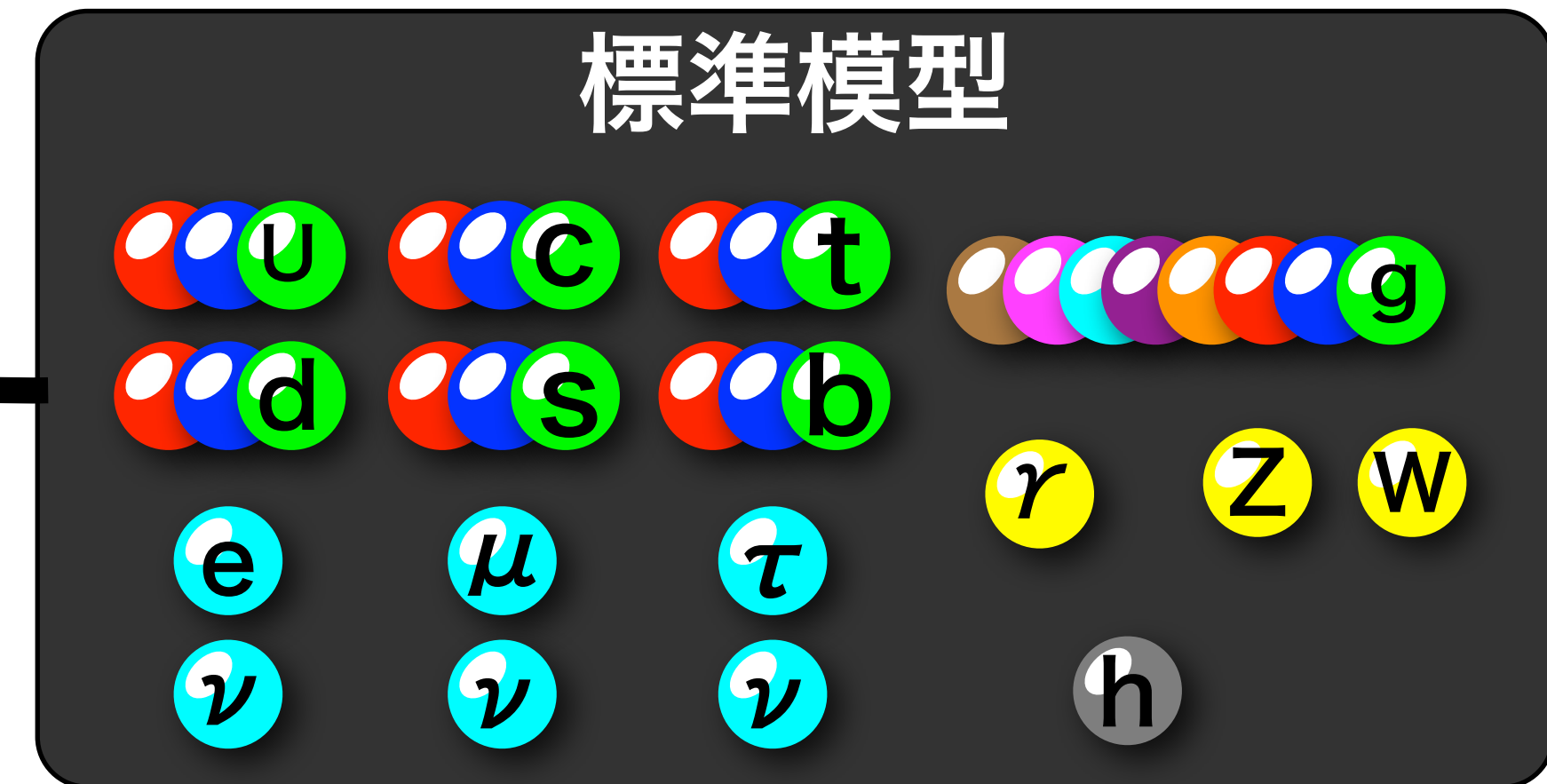


▶ 標準模型の「ラグランジアン」



このたったの数行で（ほぼ）全ての素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型

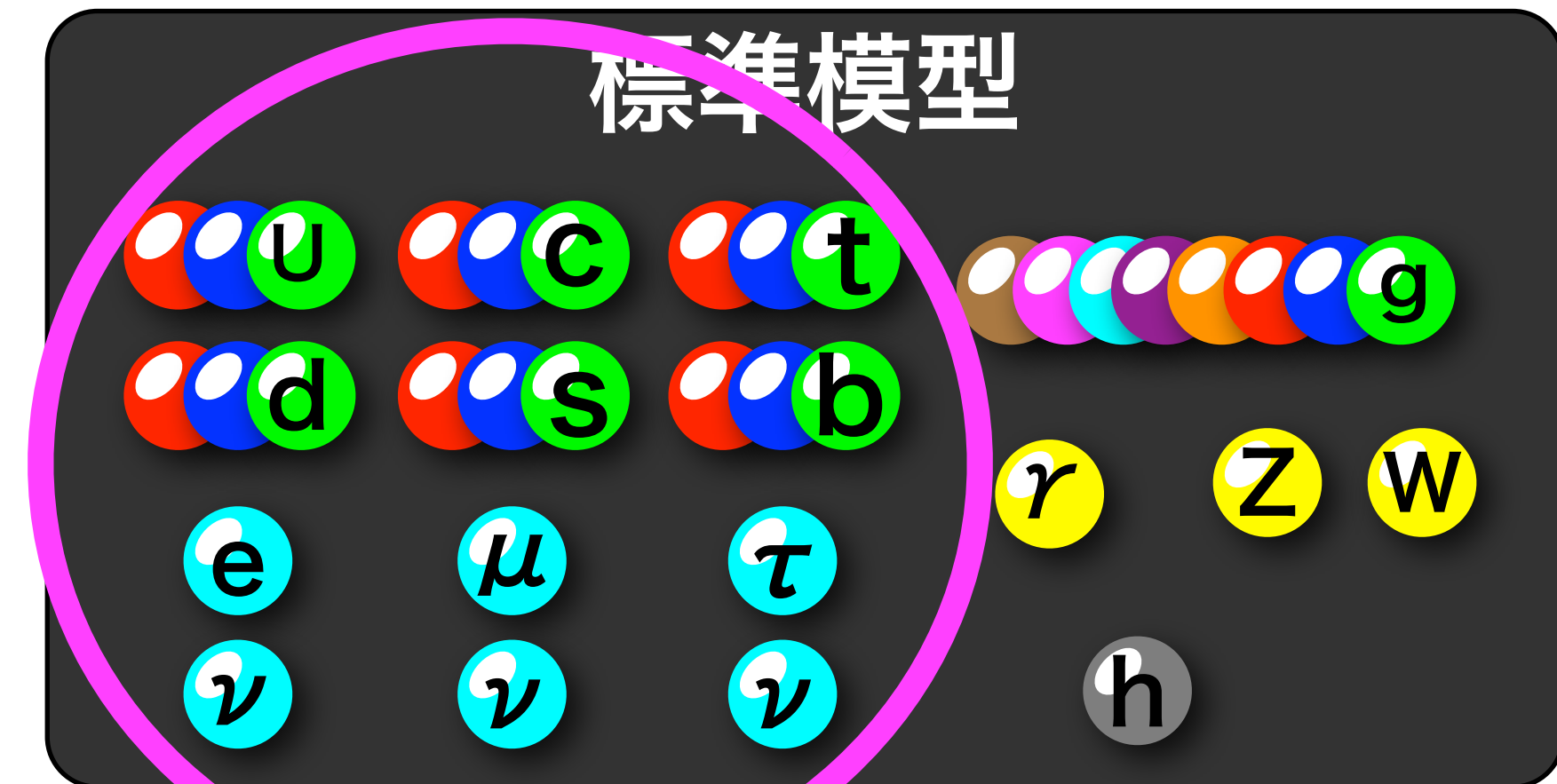


▶ 標準模型の「ラグランジアン」

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C \mathcal{A}_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

このたったの数行で（ほぼ）全ての
素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



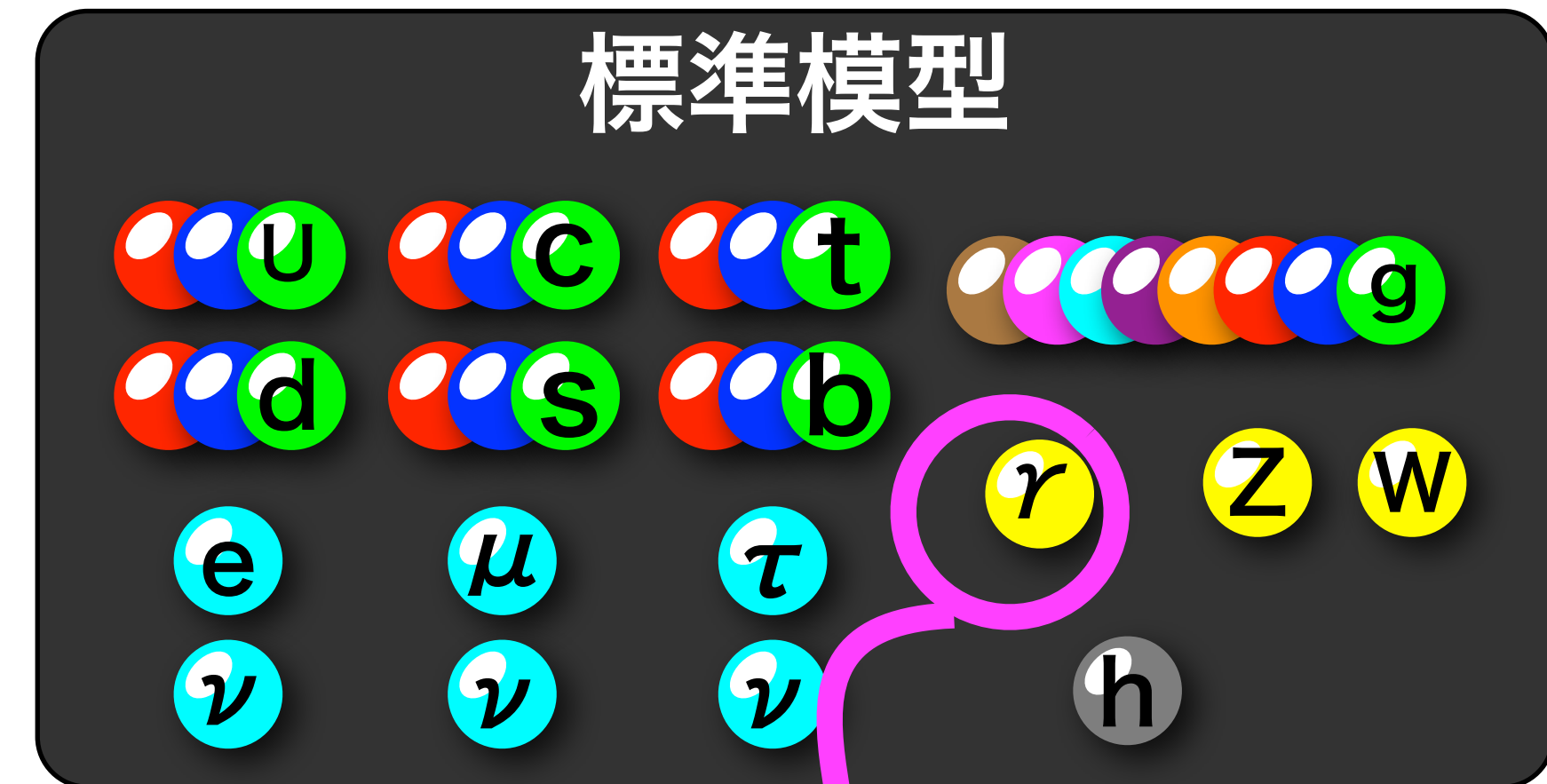
▶ 標準模型の「ラグランジアン」

クォーク、レプトン

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C \mathcal{A}_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

このたったの数行で（ほぼ）全ての
素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



▶ 標準模型の「ラグランジアン」

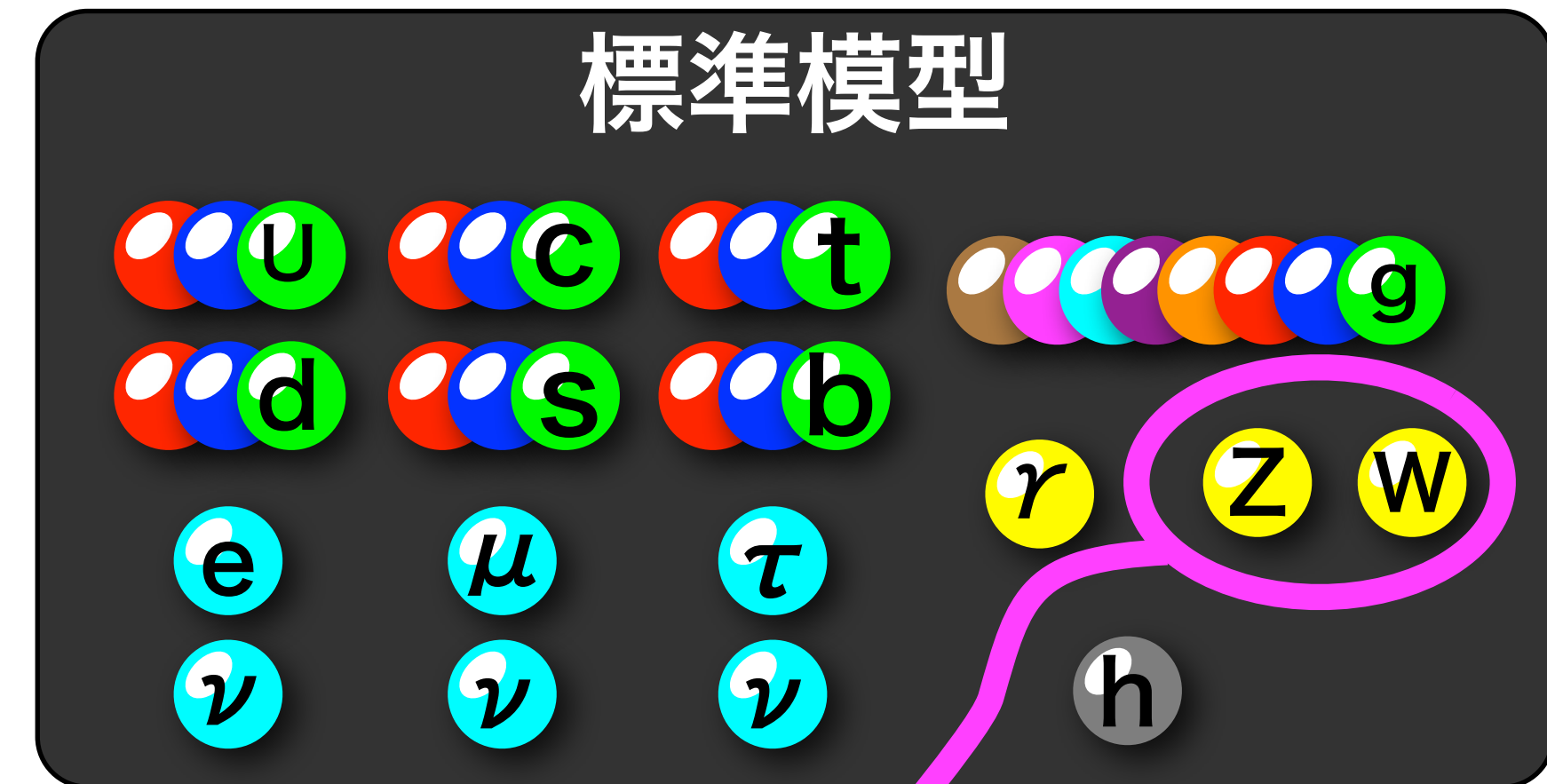
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C \mathcal{A}_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

光子

電磁気相互作用

このたったの数行で（ほぼ）全ての
素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



▶ 標準模型の「ラグランジアン」

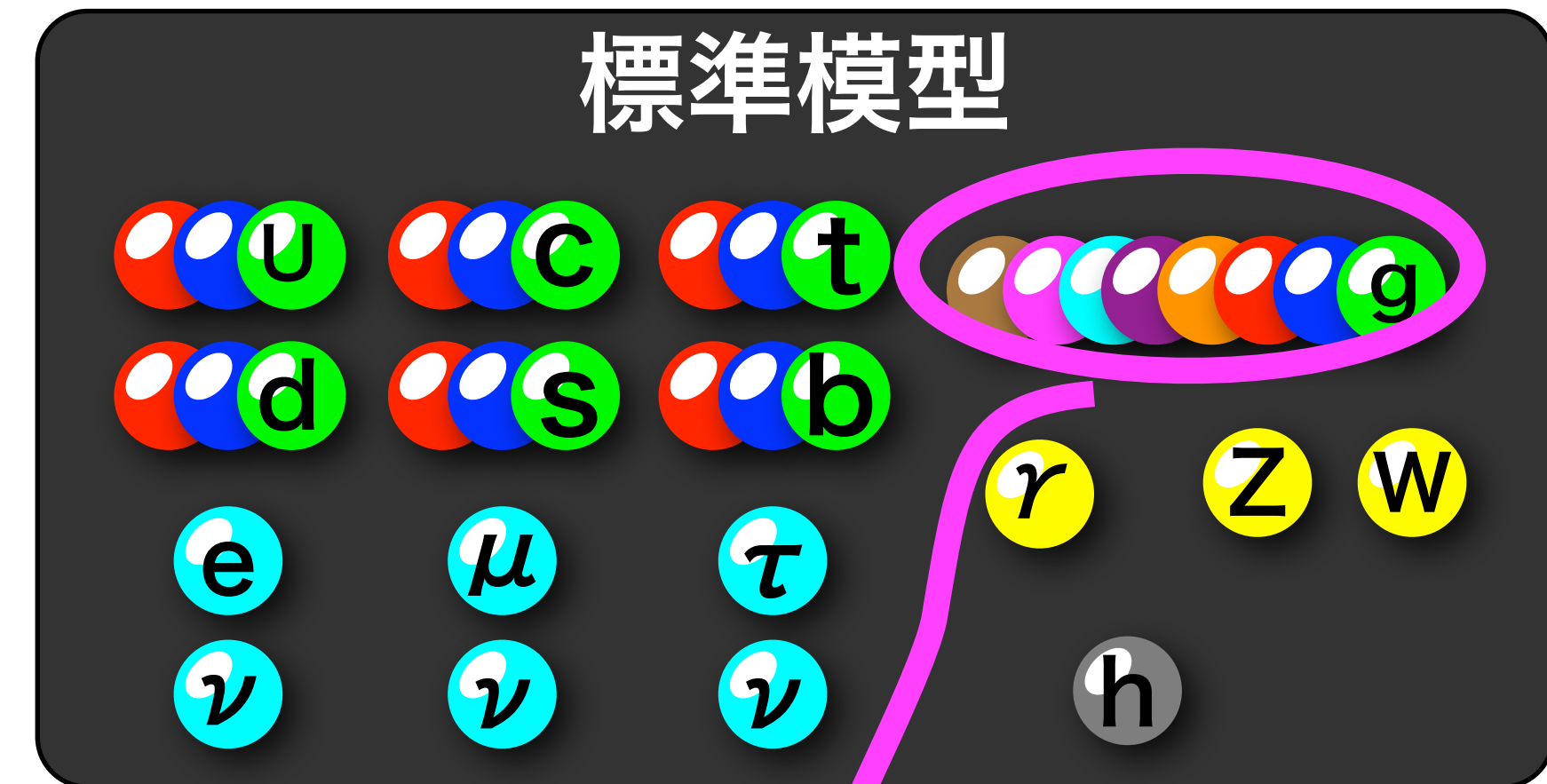
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C \mathcal{A}_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

W, Z

弱い相互作用

このたったの数行で（ほぼ）全ての
素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



▶ 標準模型の「ラグランジアン」

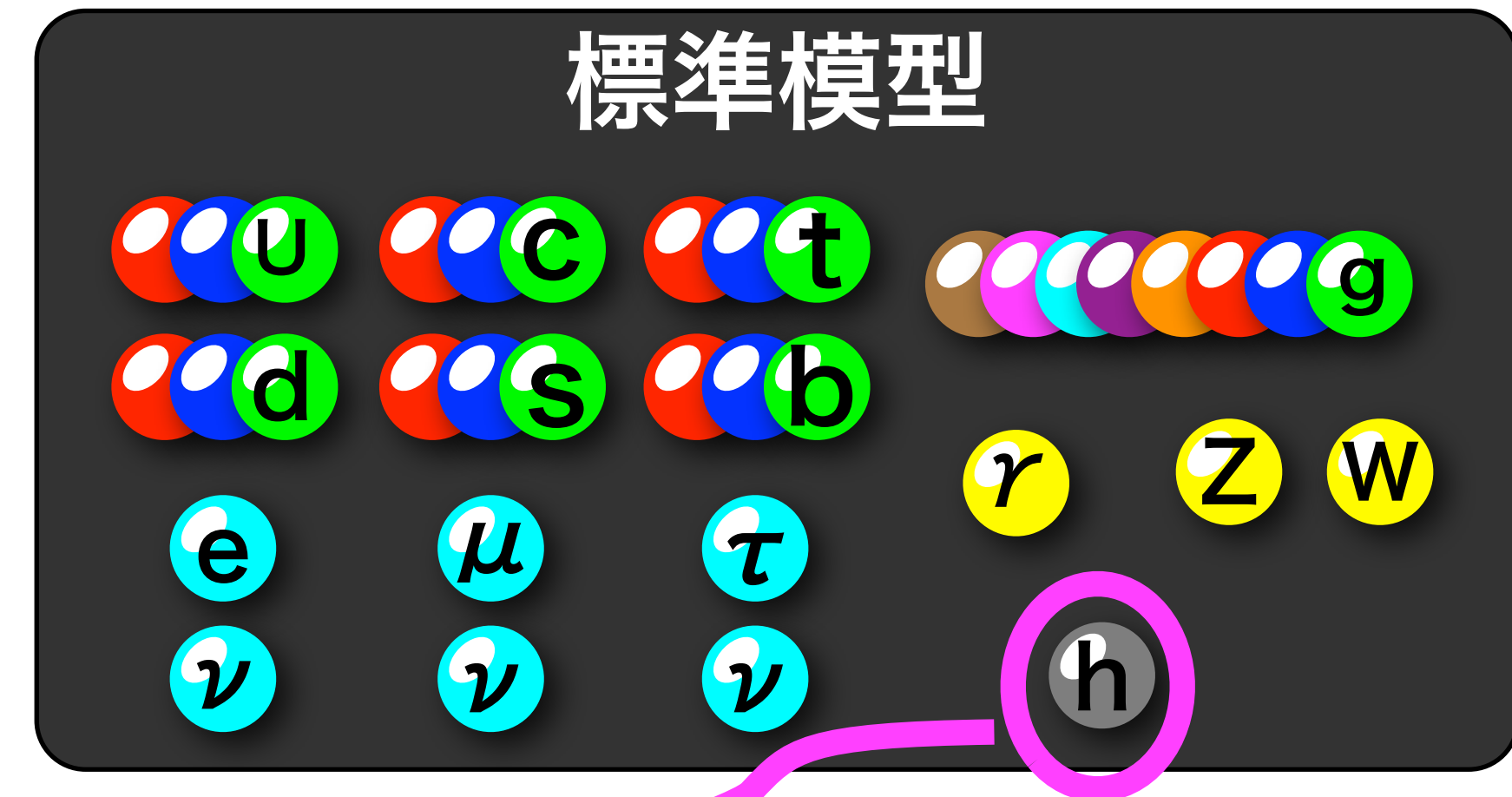
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C A_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

グルーオン

強い相互作用

このたったの数行で（ほぼ）全ての素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型



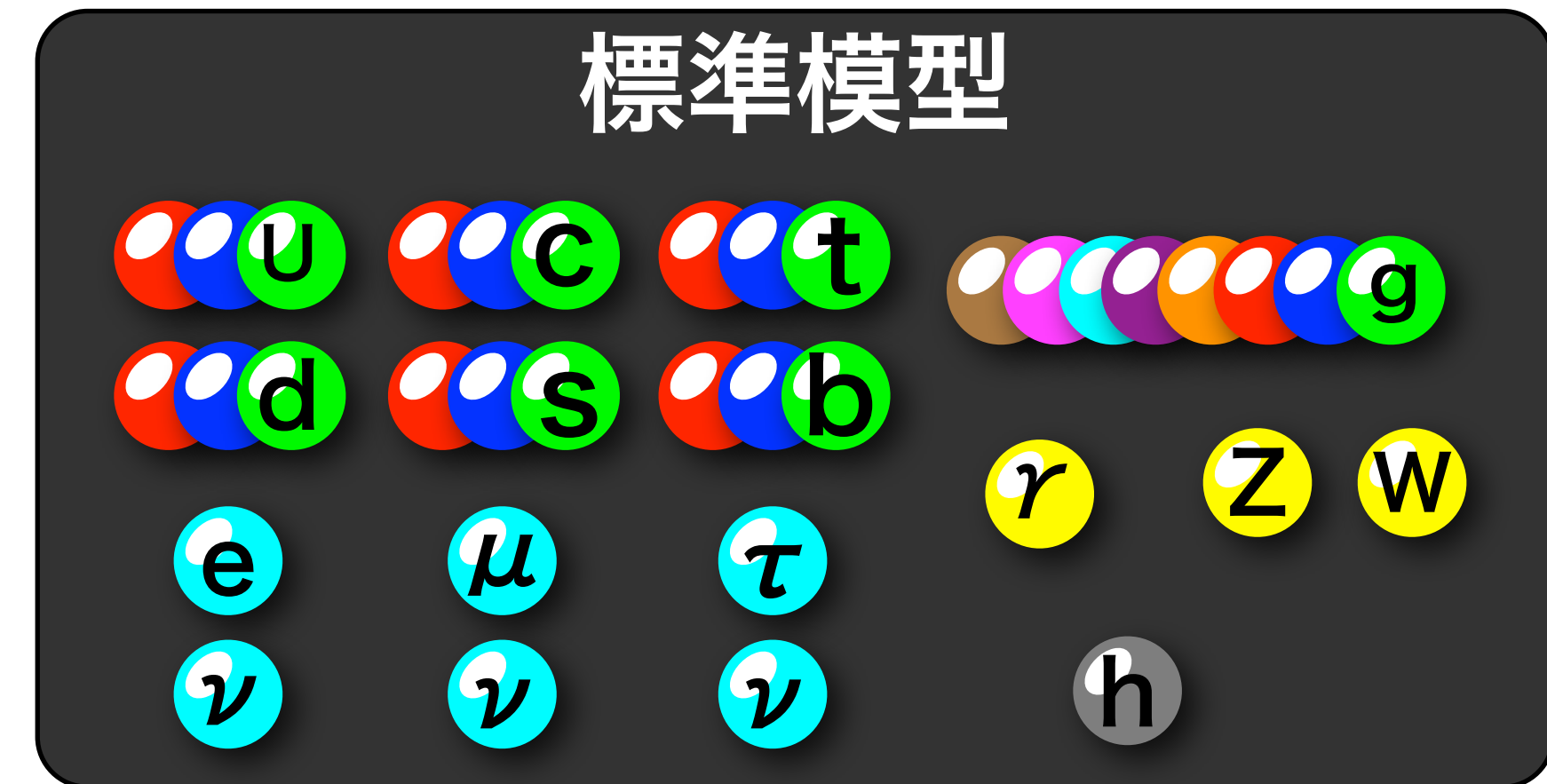
▶ 標準模型の「ラグランジアン」

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i \not{\partial} - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i \\
 & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu - \sum_q \bar{\psi}_{q,a} g_s \gamma^\mu t_{ab}^C \mathcal{A}_\mu^C \psi_{q,b} \\
 & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu . \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^A F^{A\mu\nu} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}
 \end{aligned}$$

ヒッグス

このたったの数行で（ほぼ）全ての
素粒子現象を記述出来ている！！

標準模型

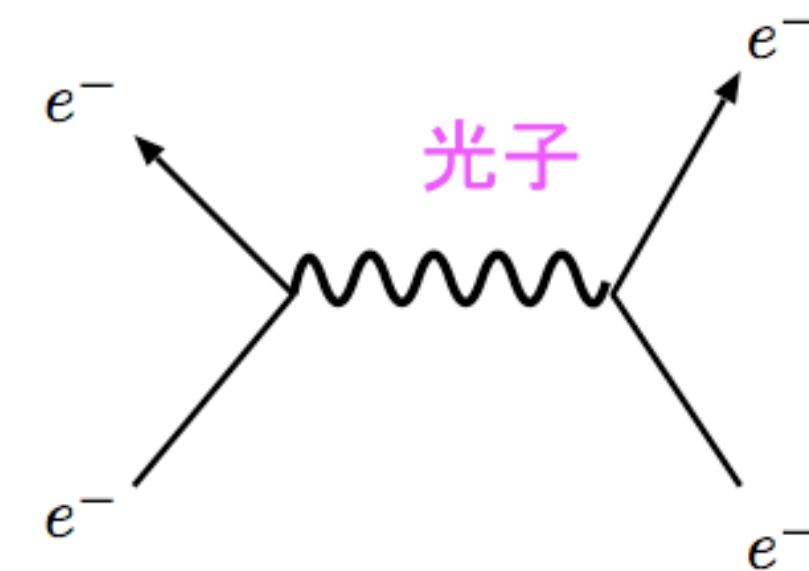


▶ 粒子同士に働く「力」も素粒子によって媒介されている。

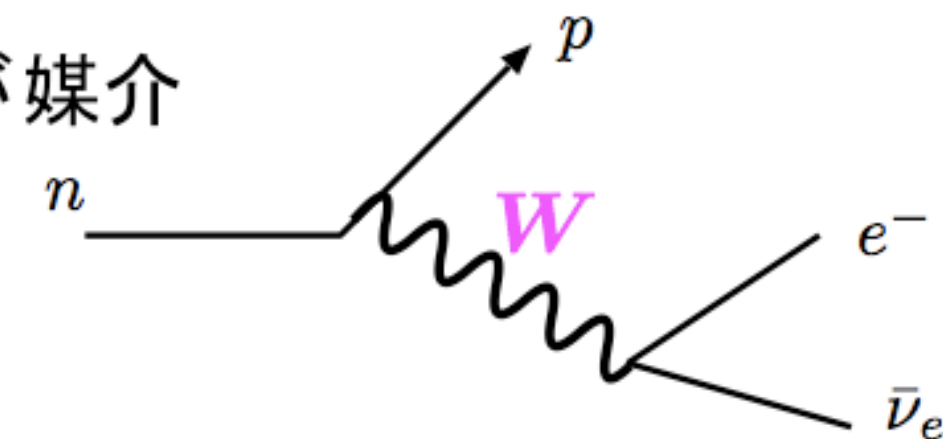
「3つの力」
= ゲージ相互作用

ゲージ粒子（ゲージボゾン）
が媒介している。

- 電磁気力 … 光子が媒介



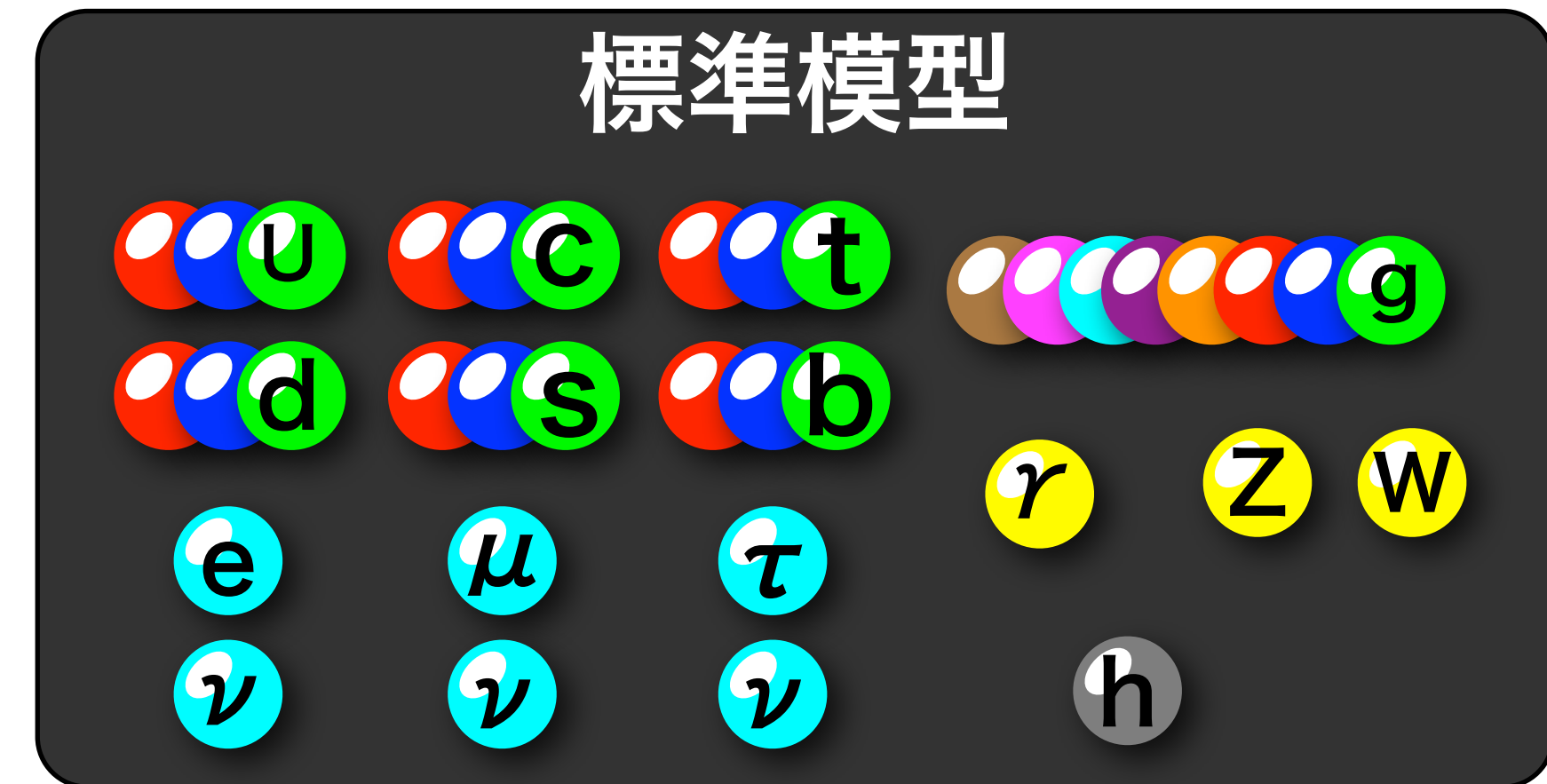
- 弱い力 … W, Z ボゾンが媒介



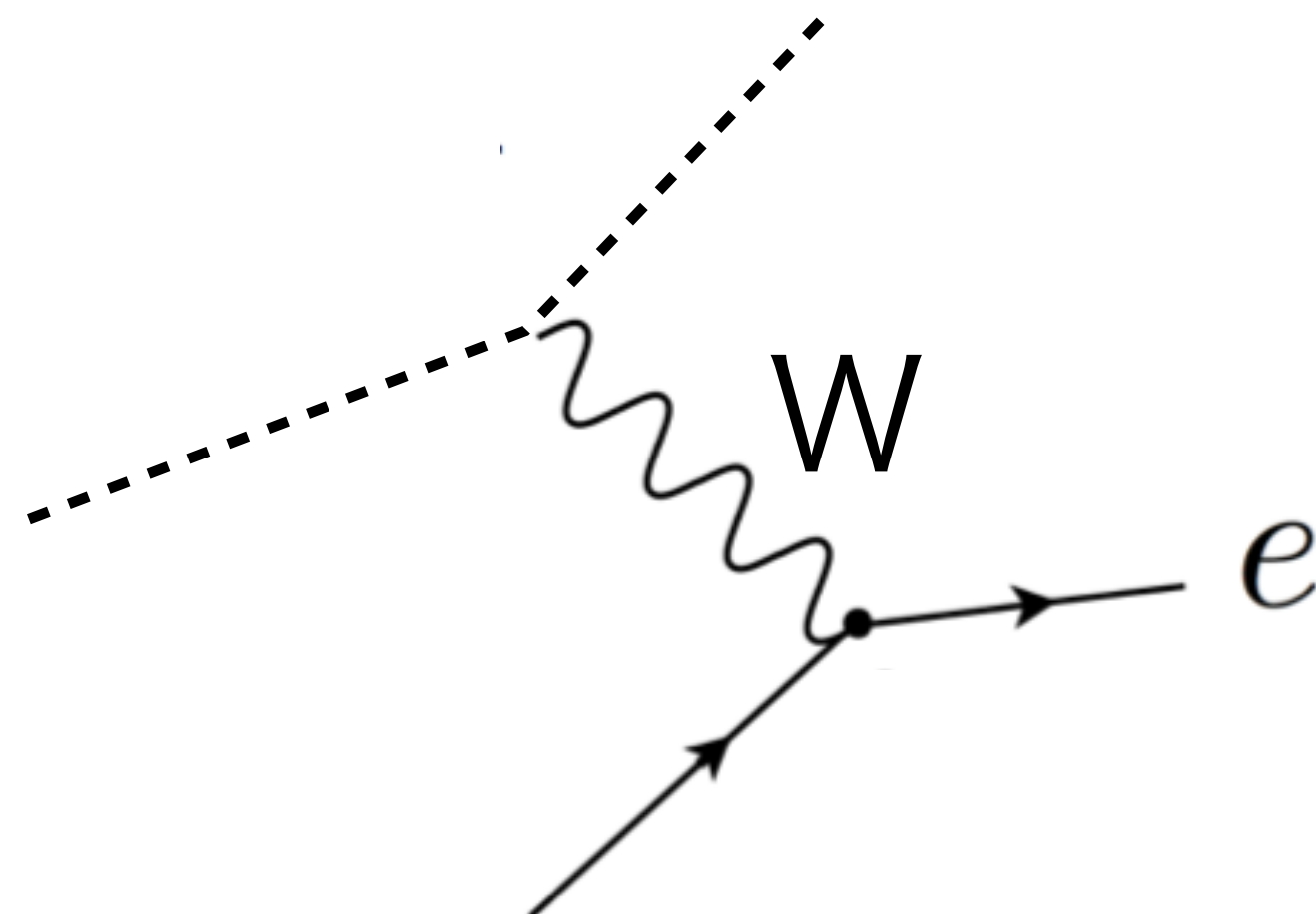
- 強い力 … グルーオンが媒介



標準模型



▶ 相互作用は粒子の種類を変えることもある。

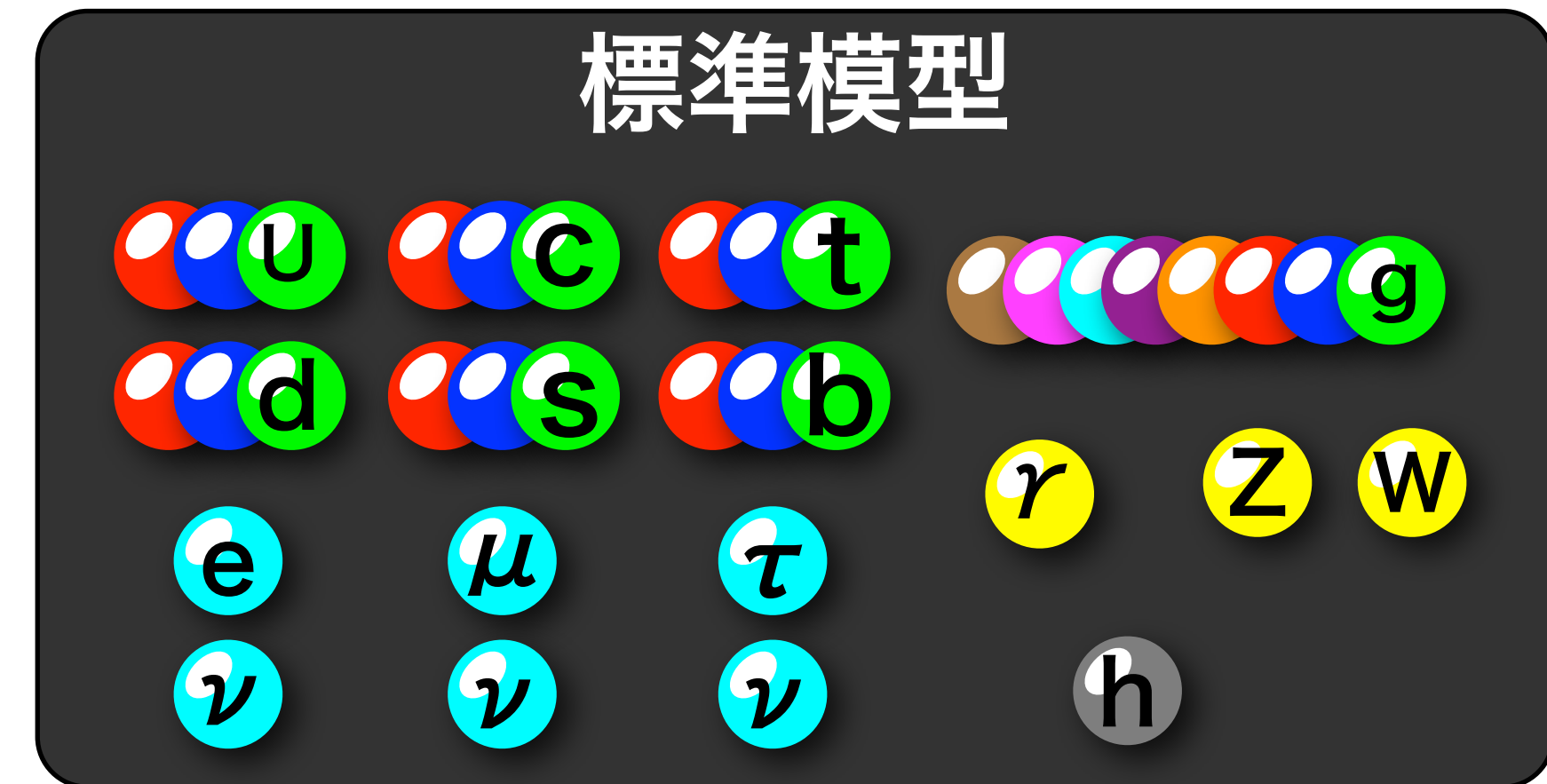


ニュートリノ

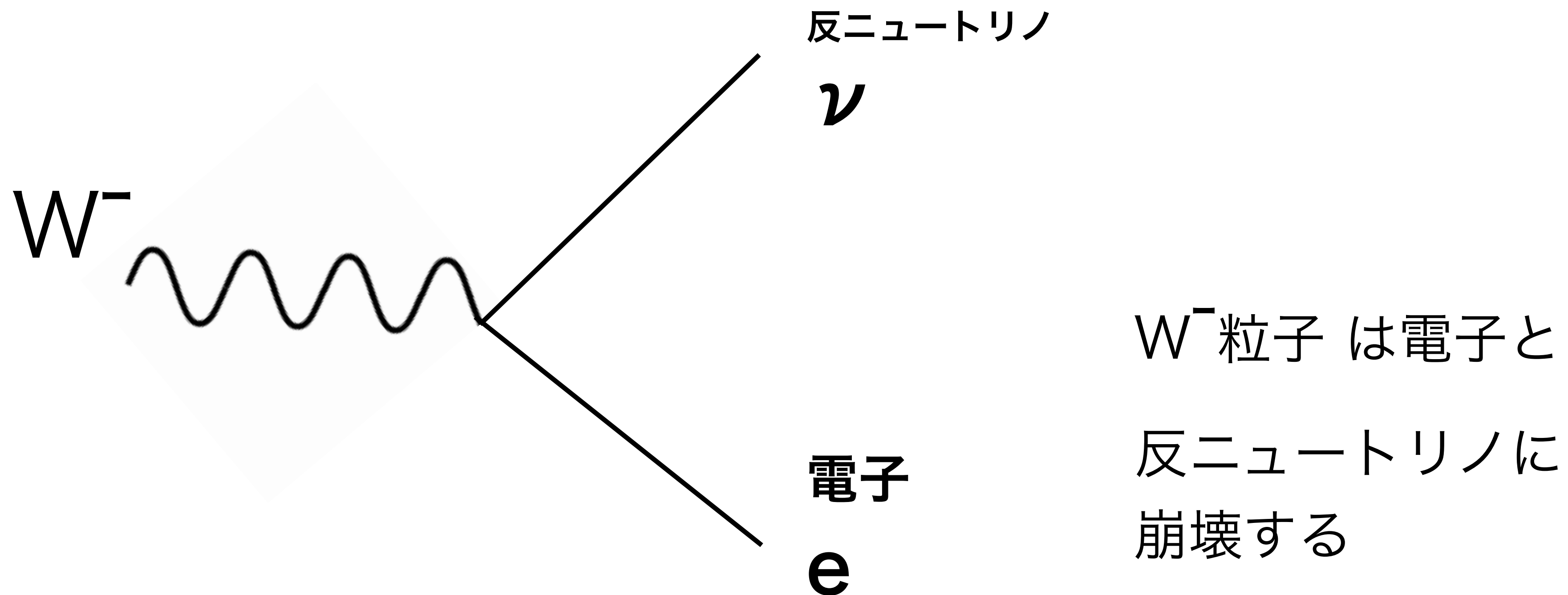
ν

W との相互作用で
ニュートリノが電子に化ける

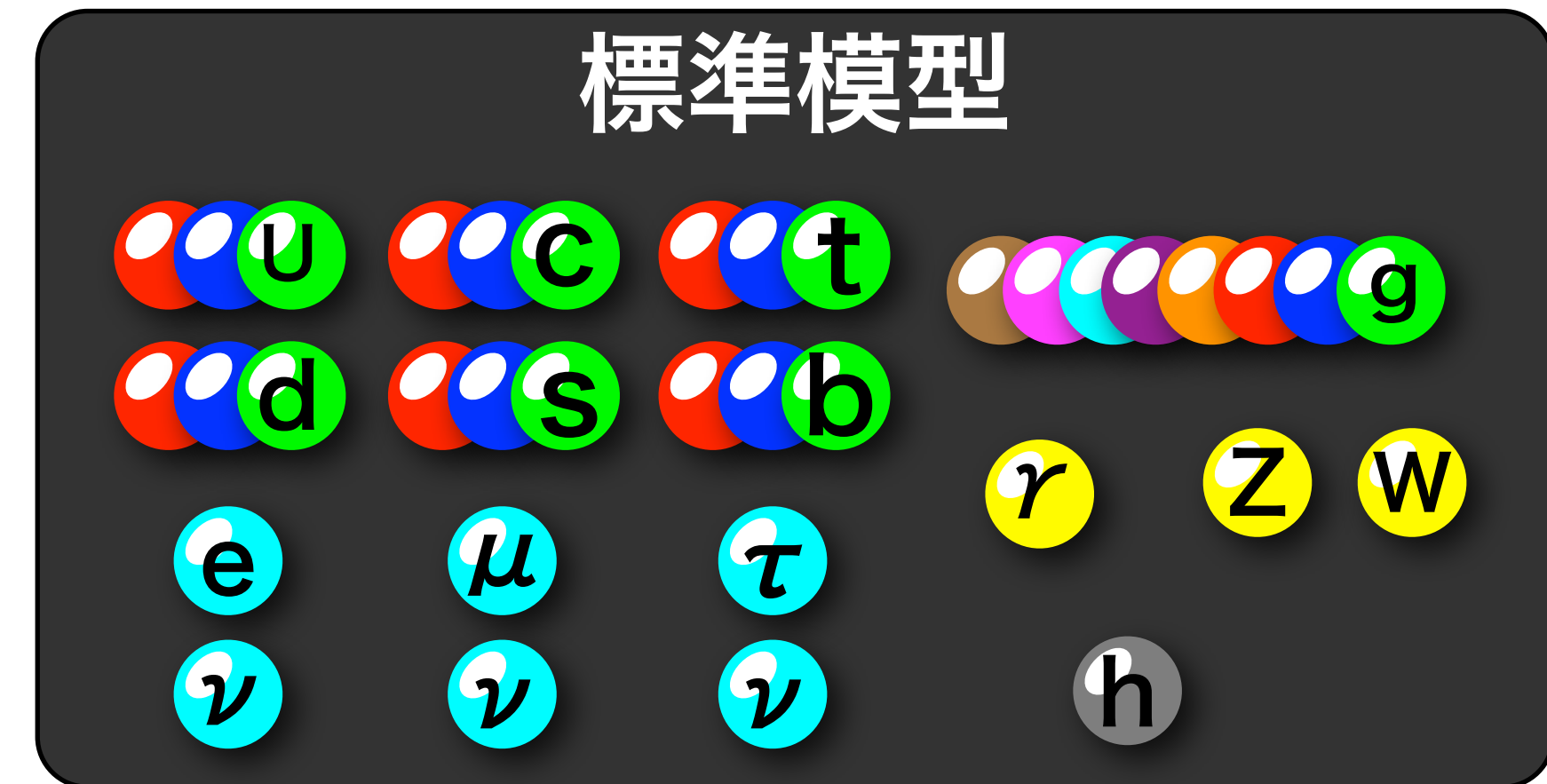
標準模型



▶ 相互作用は粒子同士の散乱だけでなく「崩壊」も引き起こす。



標準模型



※この中の ほとんどの粒子が通常見えないのは

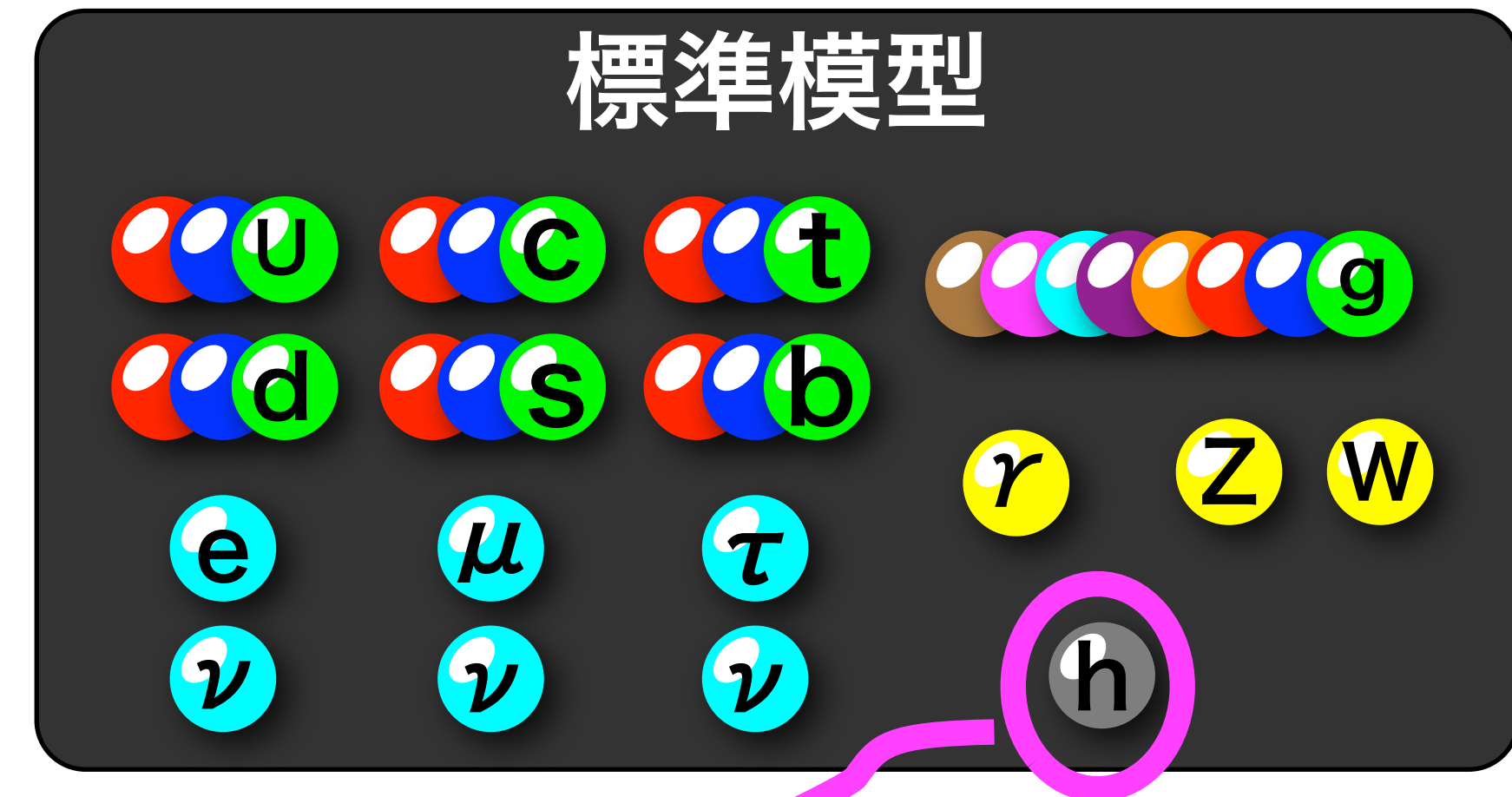
(1) 重すぎて通常の素粒子反応のエネルギーでは出来ないから

(2) 作られてもすぐに崩壊してしまうから

標準模型

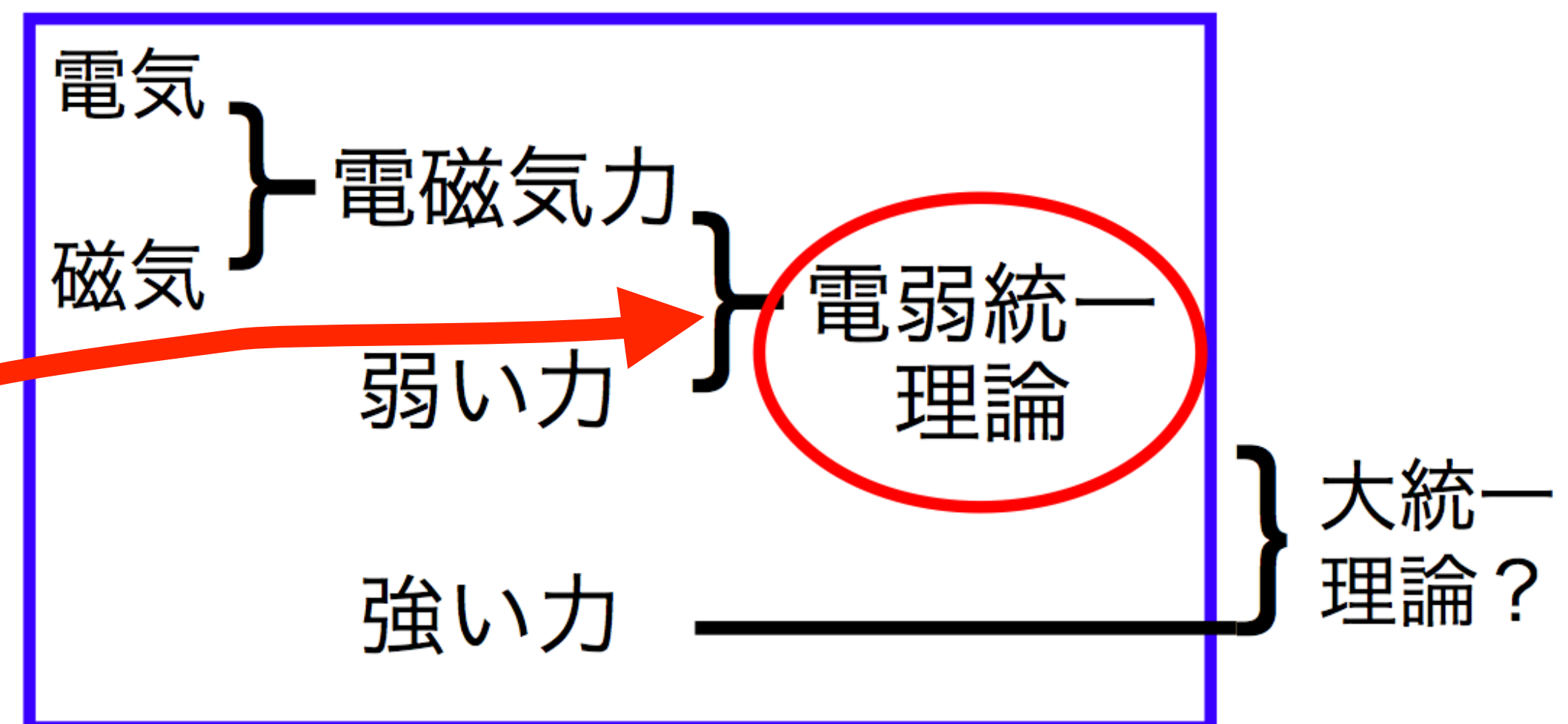
▶ ヒッグスについて

- 標準模型の要



素粒子の標準模型

「ヒッグス場」による
「自発的対称性の破れ」が
電磁気力と弱い力の
統一の中心的役割を
果たしている



標準模型

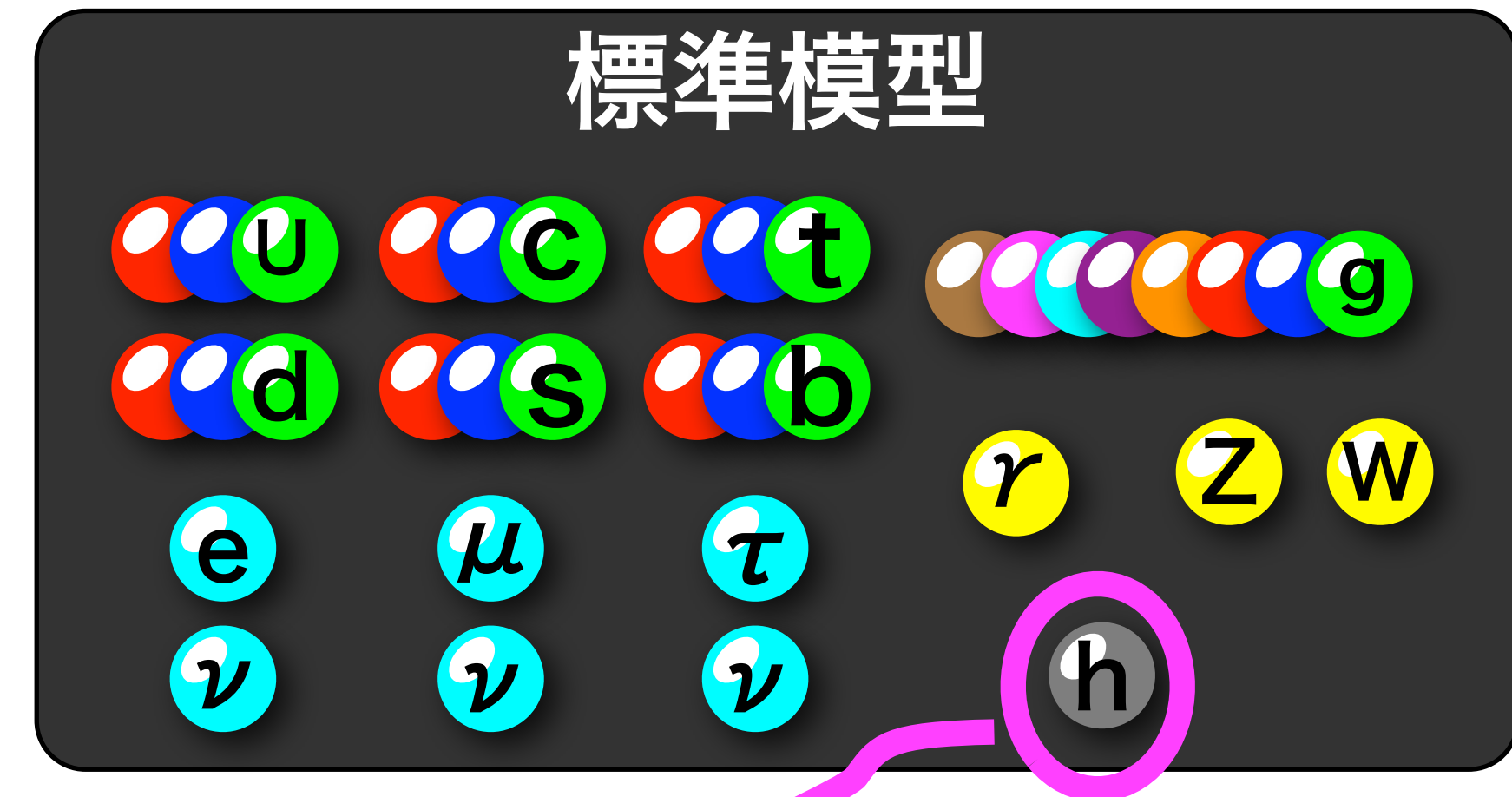


▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

例えば電子：

標準模型



▶ ヒッグスについて

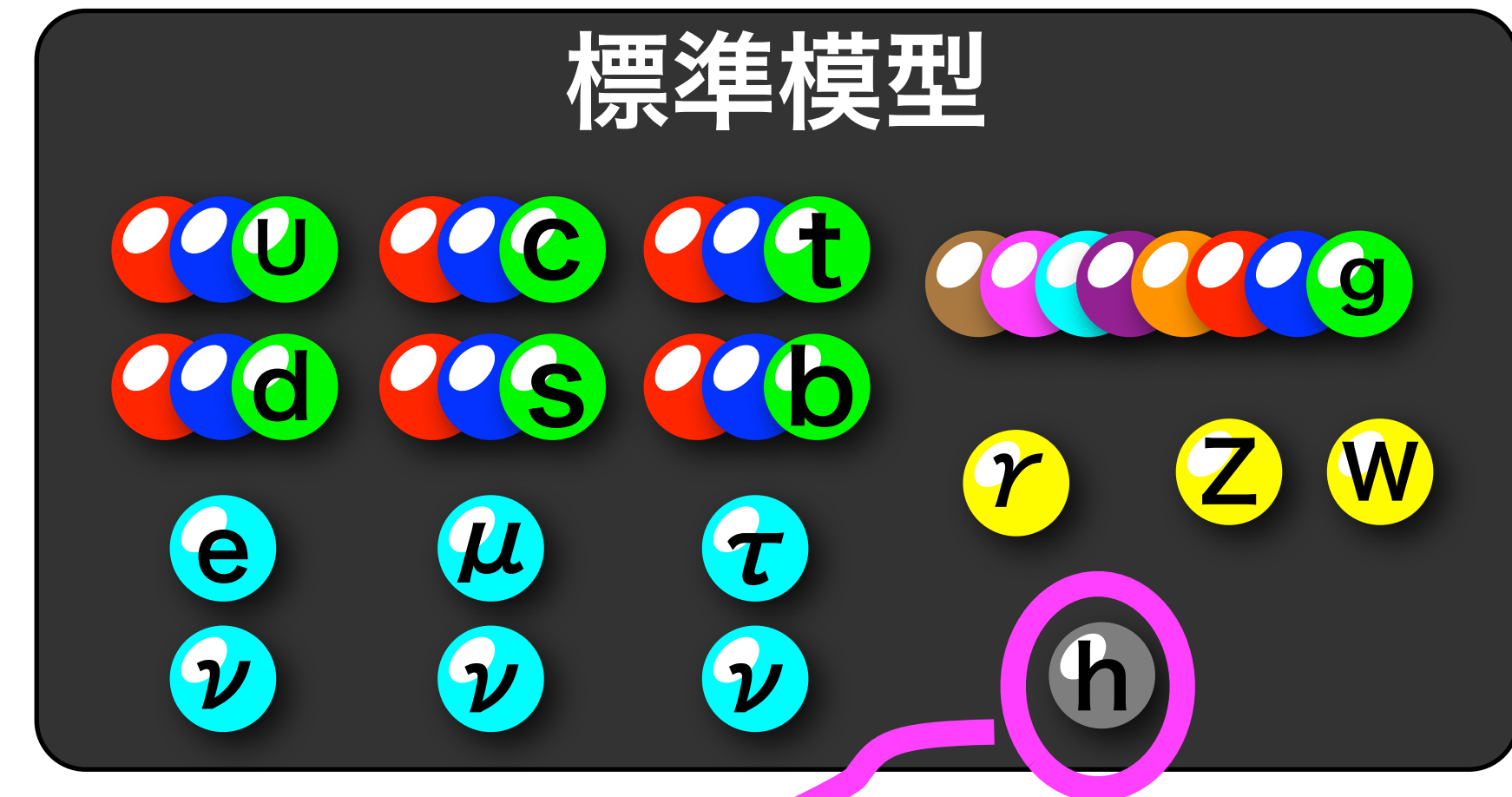
- 全ての素粒子の質量の起源

例えば電子：電子には右巻き成分と左巻き成分がある

$$\text{電子 } e = \text{右巻き電子 } e_R + \text{左巻き電子 } e_L$$

(弱い相互作用しない) (弱い相互作用する)

標準模型



▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

例えば電子：実はヒッグスがいないと・・・

(弱い相互作用しない)

右巻き電子 e_R

左巻き電子 e_L

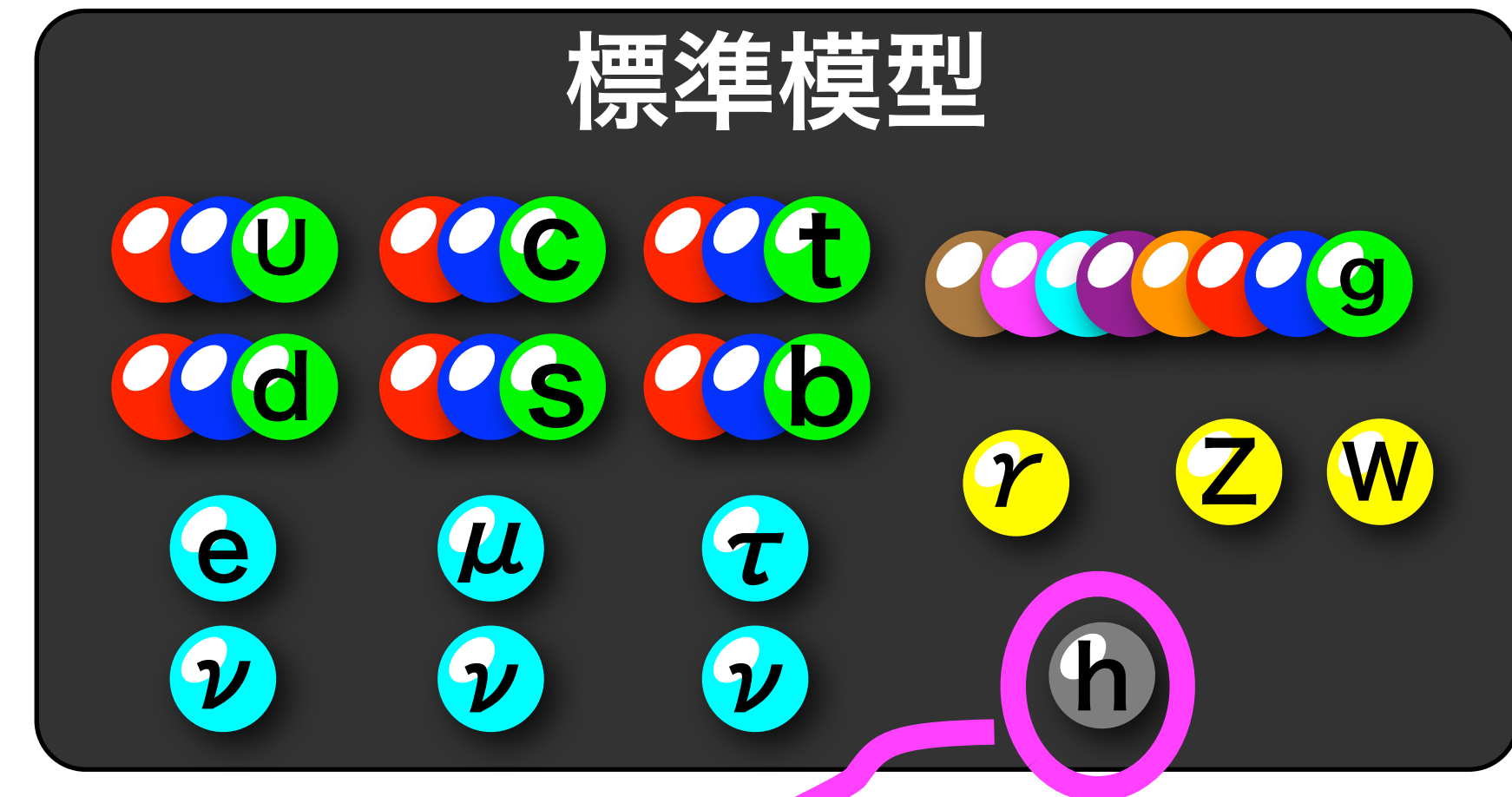
(弱い相互作用する)

別々の粒子

しかもそれぞれ質量ゼロ

(質量ゼロ：常に光速)

標準模型



▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

例えば電子：しかしヒッグスのおかげで・・・

(弱い相互作用しない)

右巻き電子 e_R

左巻き電子 e_L

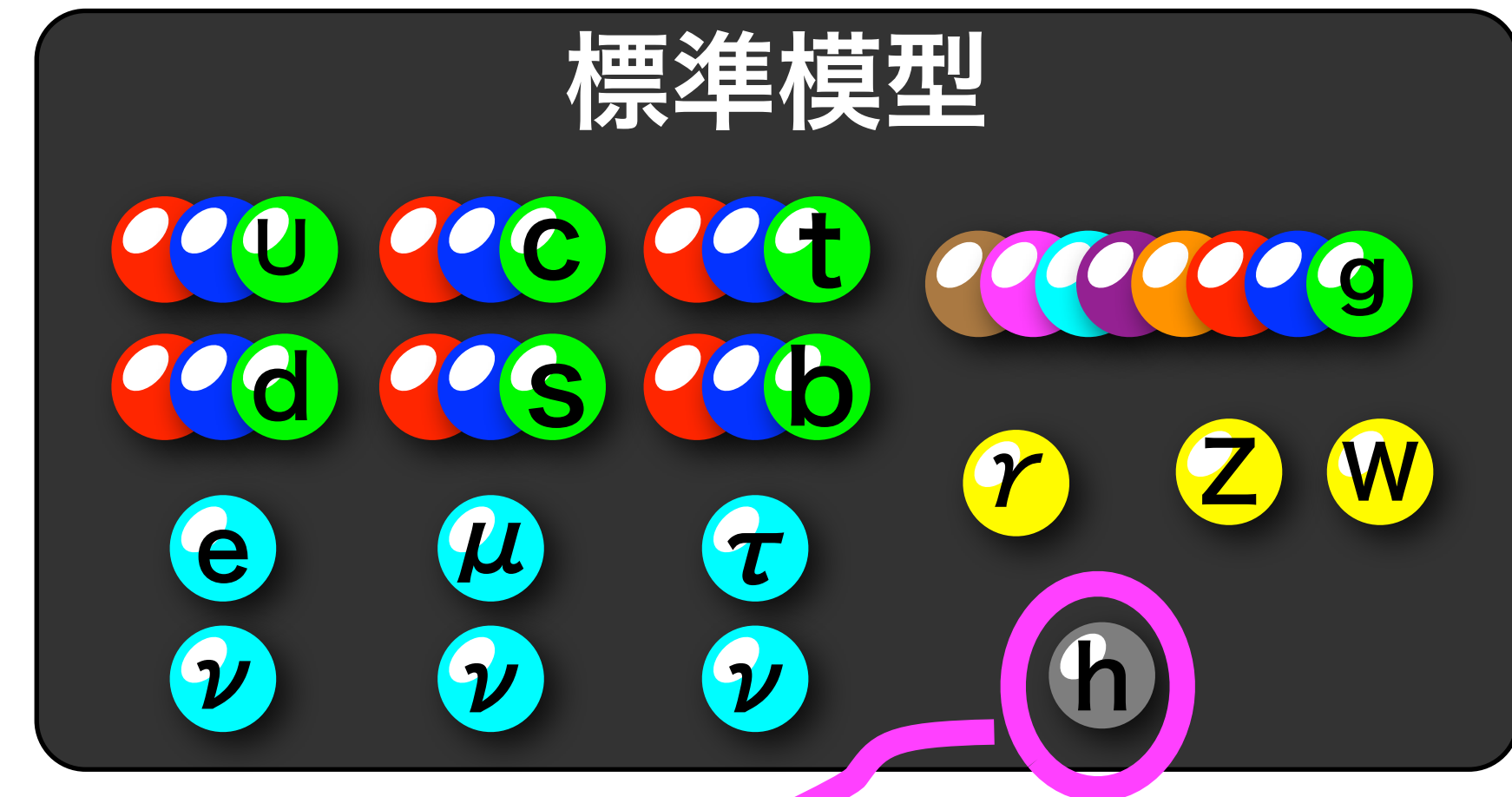
(弱い相互作用する)

右巻きと左巻きがつながる

----- ヒッグス

Yukawa 相互作用

標準模型

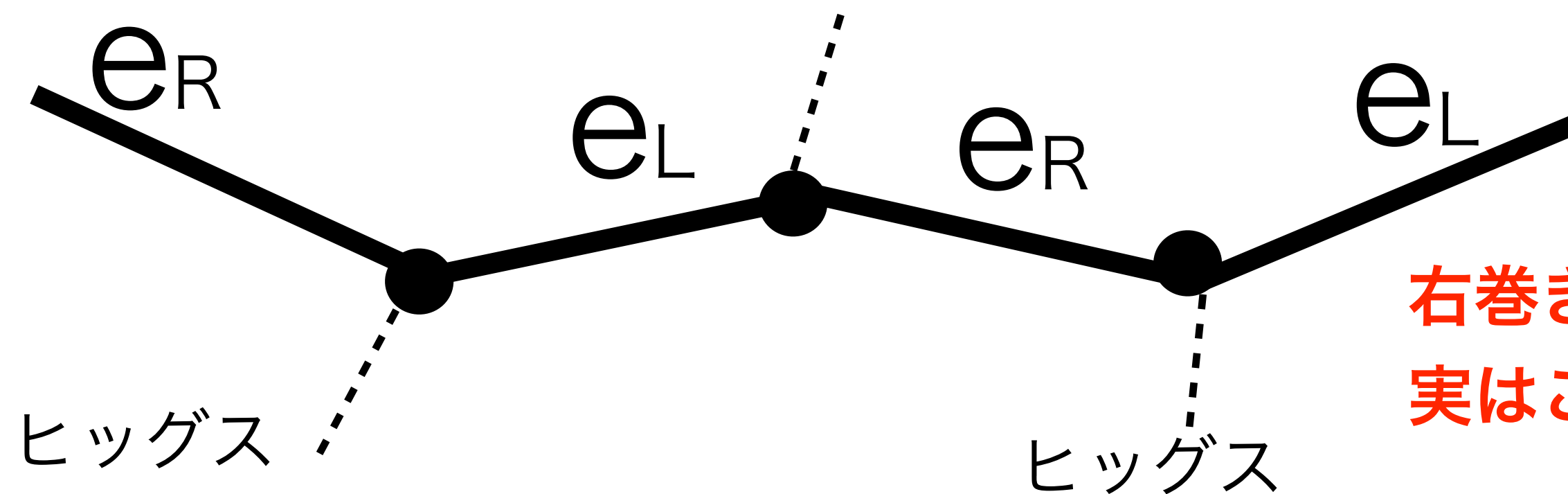


▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

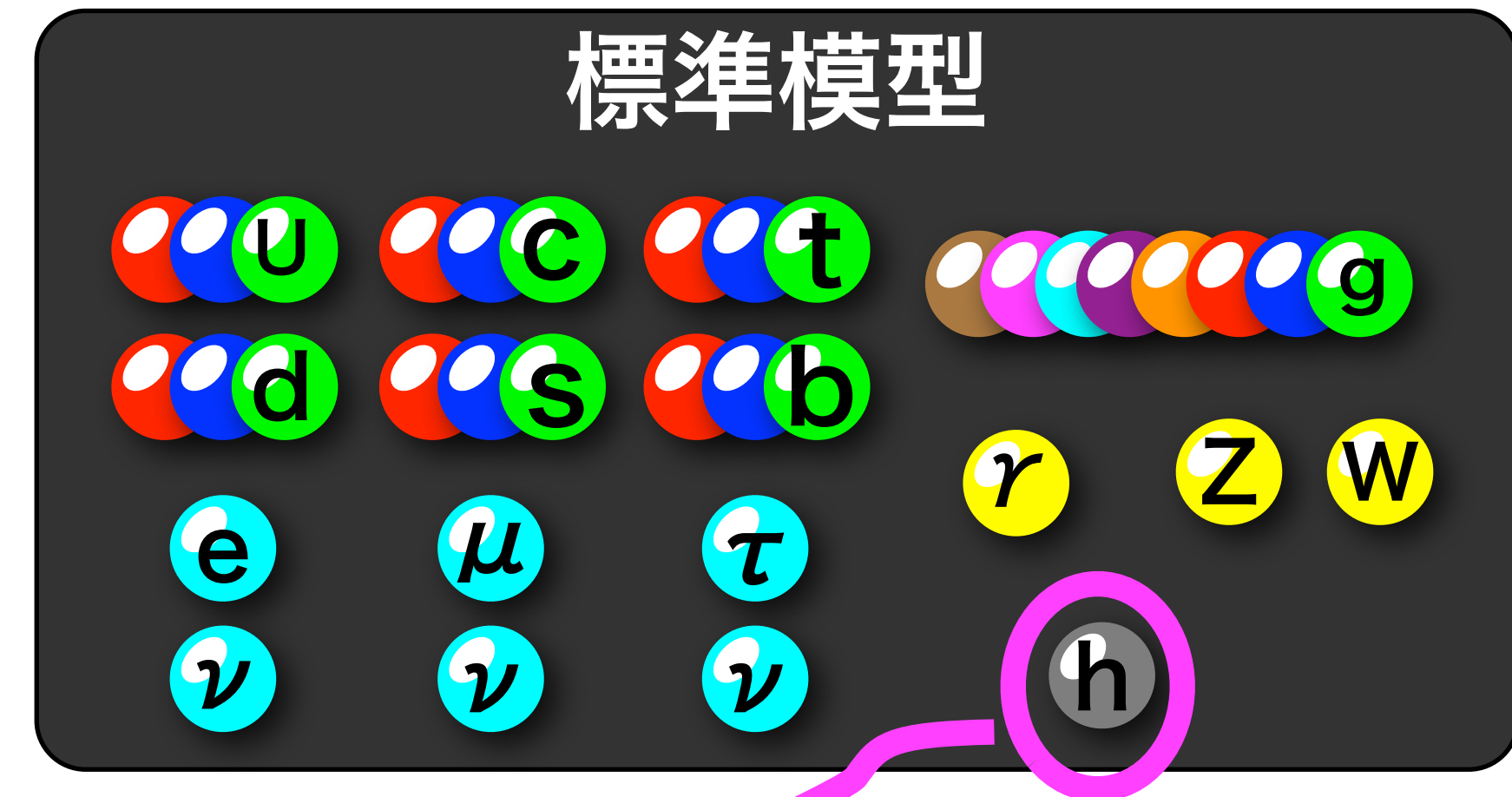
例えば電子：

「ヒッグス場」が「真空中に凝縮」してくれるおかげで・・・



右巻きと左巻きが自在に行き来出来る。
実はこれにより電子は「質量」を得る。

標準模型



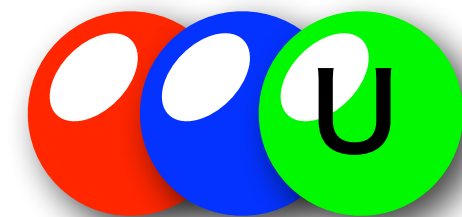
▶ ヒッグスについて

- 全ての素粒子の質量の起源

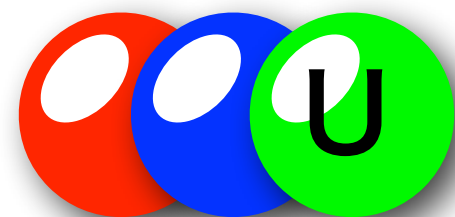
左巻き

右巻き

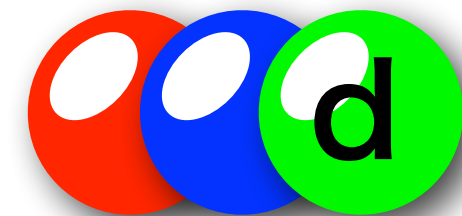
クォーク



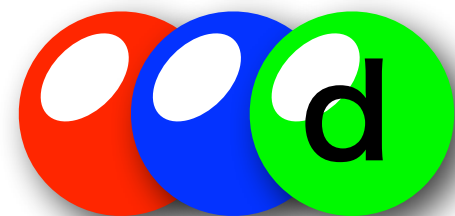
+



→ 質量をもつ

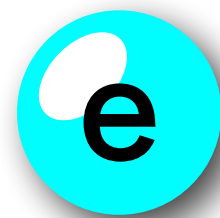


+



→ 質量をもつ

電子



+



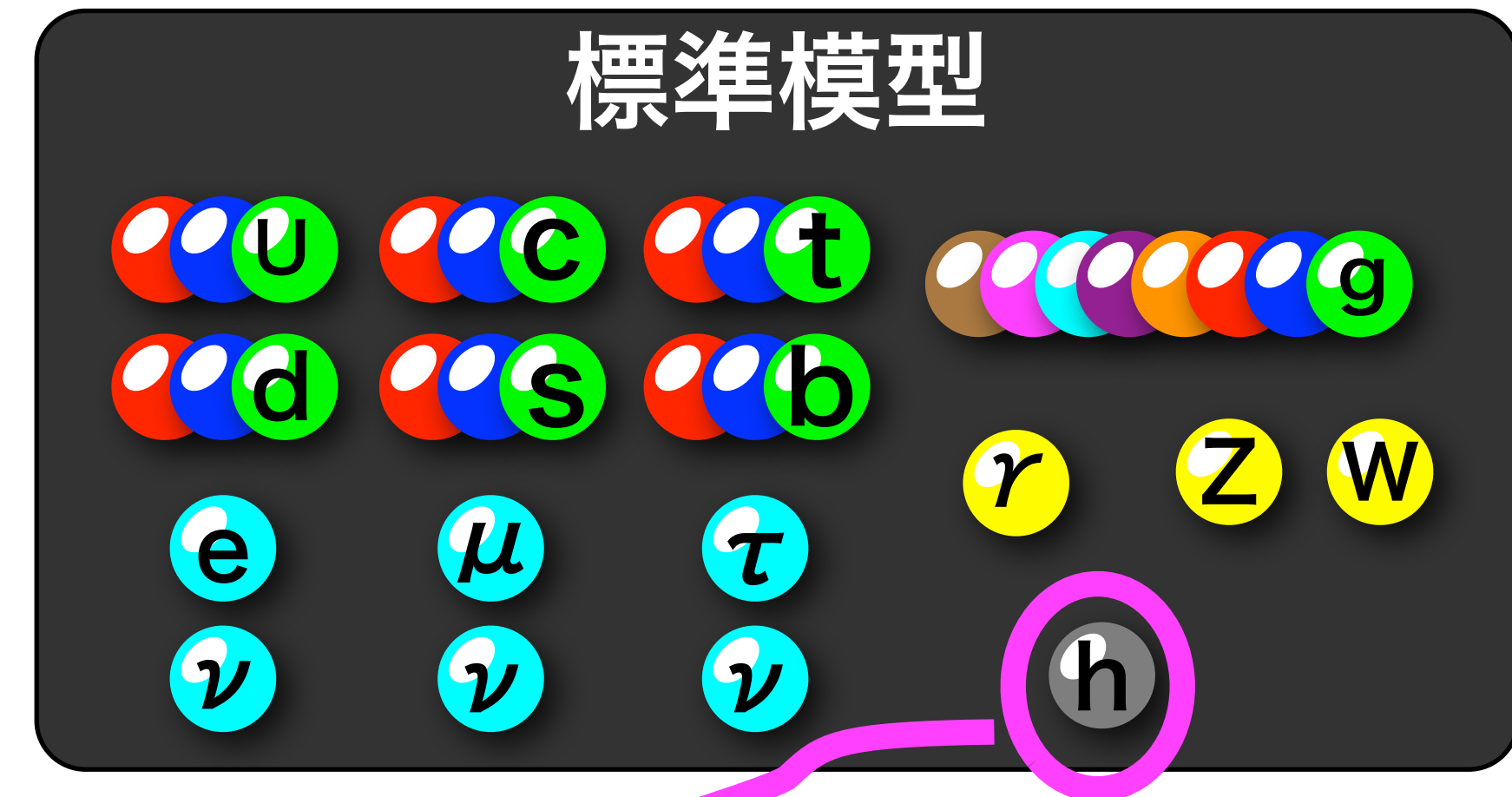
→ 質量をもつ

ニュートリノ



(+ N ?)

標準模型



▶ ヒッグスについて

- 標準模型の要
- 全ての素粒子の質量の起源

▶ ヒッグス粒子：ヒッグス場に対応する素粒子

→ とても重要な素粒子

ヒッグス粒子は
標準模型の最後の素粒子だったが、
2012年についてに発見された。

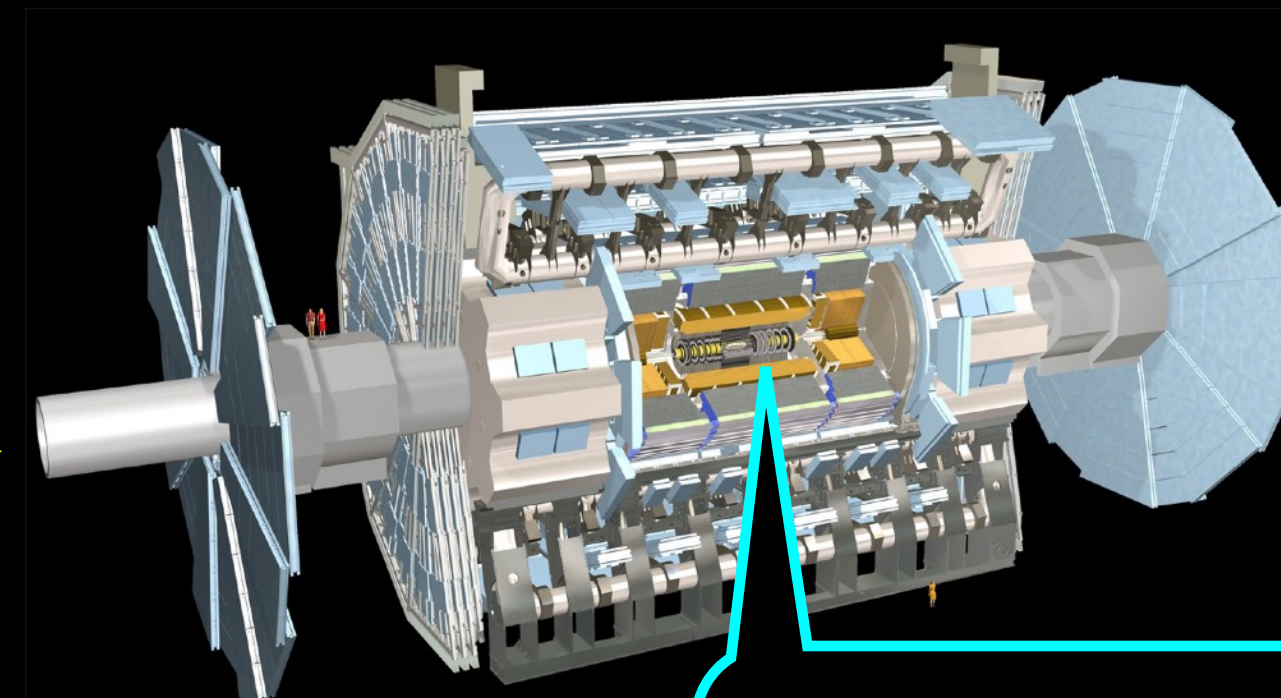


CMS 検出器
ATLASのラ

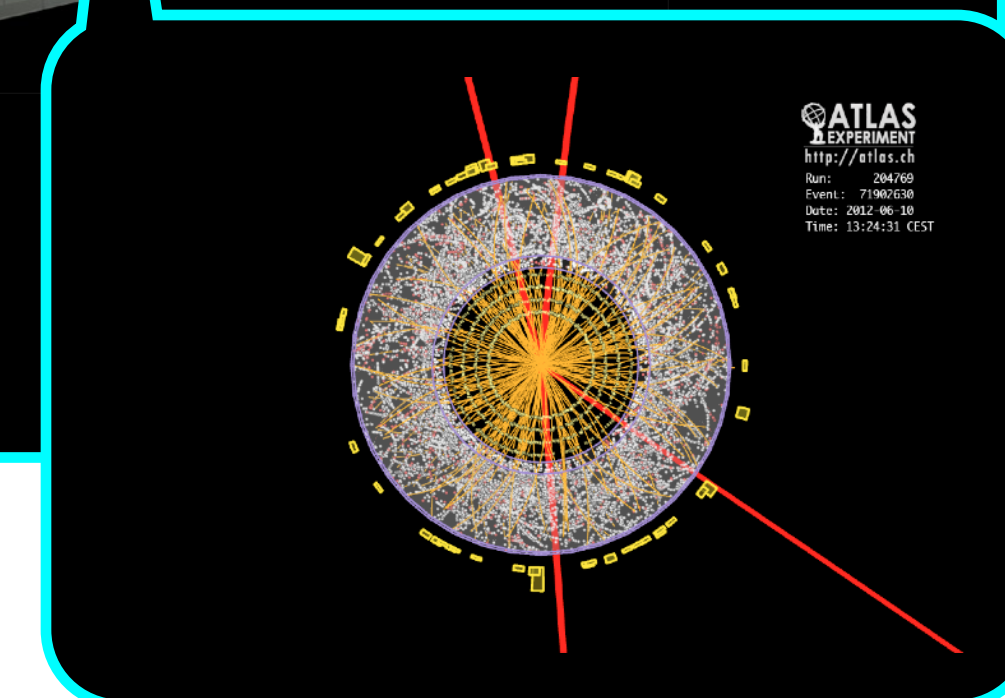
「写真提供 © CERN アトラス実験グループ」 <http://atlas.kek.jp/photo.html>

：陽子を 光速の
99% まで加速→衝突

陽子



ATLAS 検出器
さ25m 長さ44m



ヒッグス粒子は
標準模型の最後の素粒子だったが、
2012年についてに見された。

じゃあヒッグス粒子の発見によって
究極の素粒子理論が完成したの??

・・・いや、まだ解けていない謎があるんです。

◆標準模型ここまで

・ここから本題

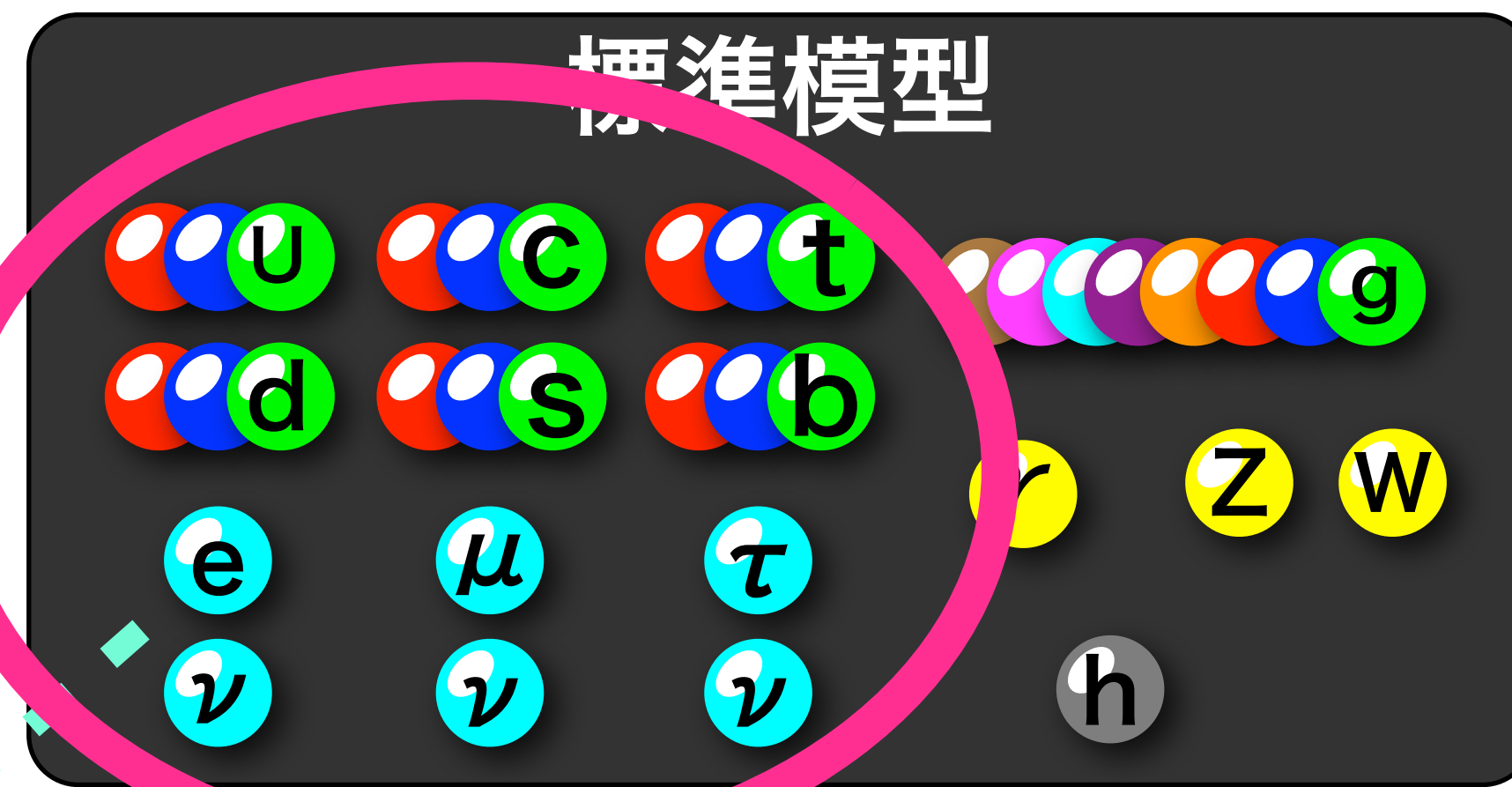
標準模型を超える物理の動機／ヒント

宇宙

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

こいつらの話

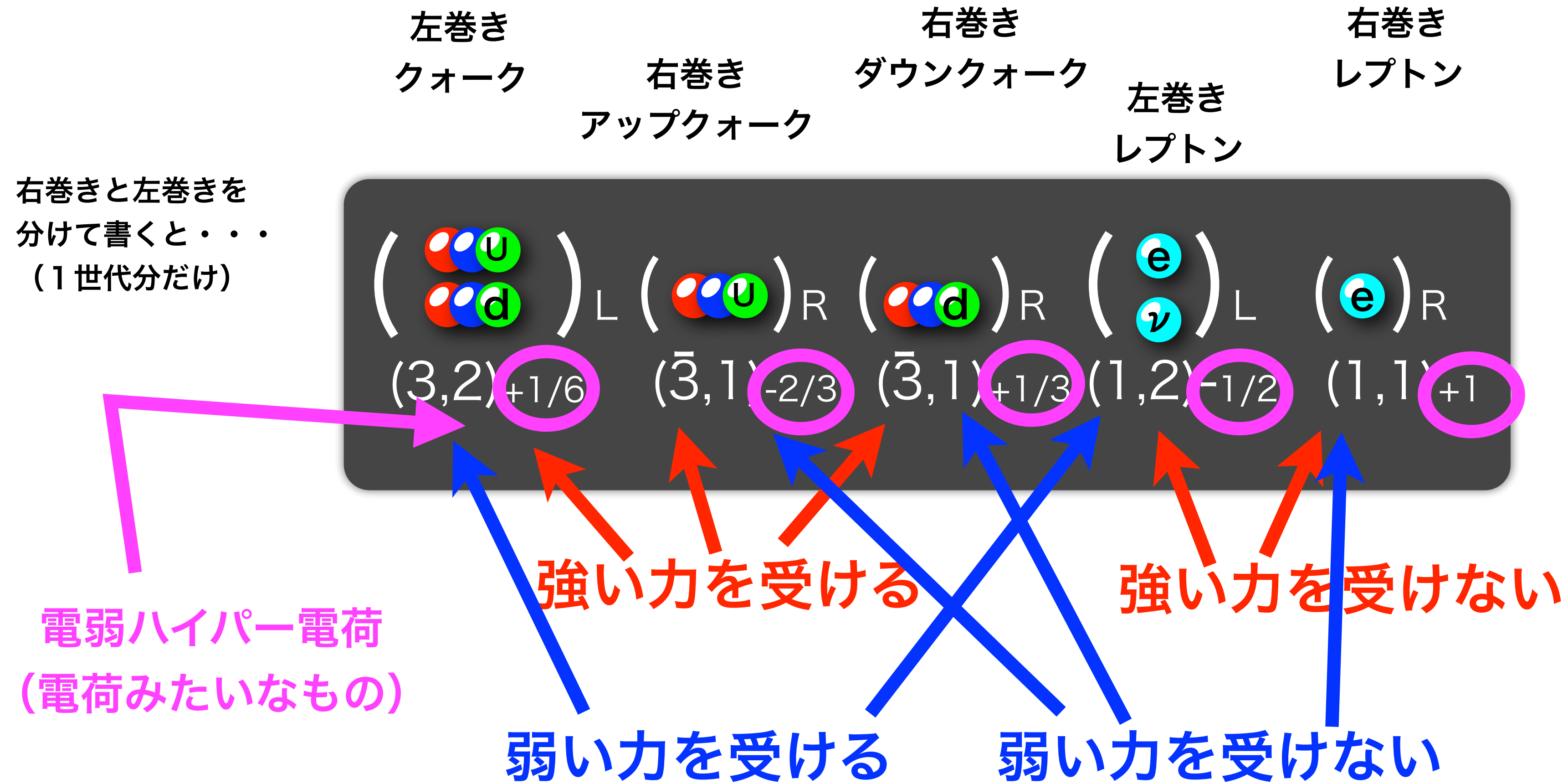


ヒッグスのところの電子のことを思い出すと・・・

電子 e = 右巻き電子 e_R + 左巻き電子 e_L

(弱い相互作用しない) (弱い相互作用する)

他のクォーク、レプトンも「右巻き」と「左巻き」に分かれている。(で、Higgsのおかげで一緒になって質量持ってる。)



・・・なんかバラバラ！

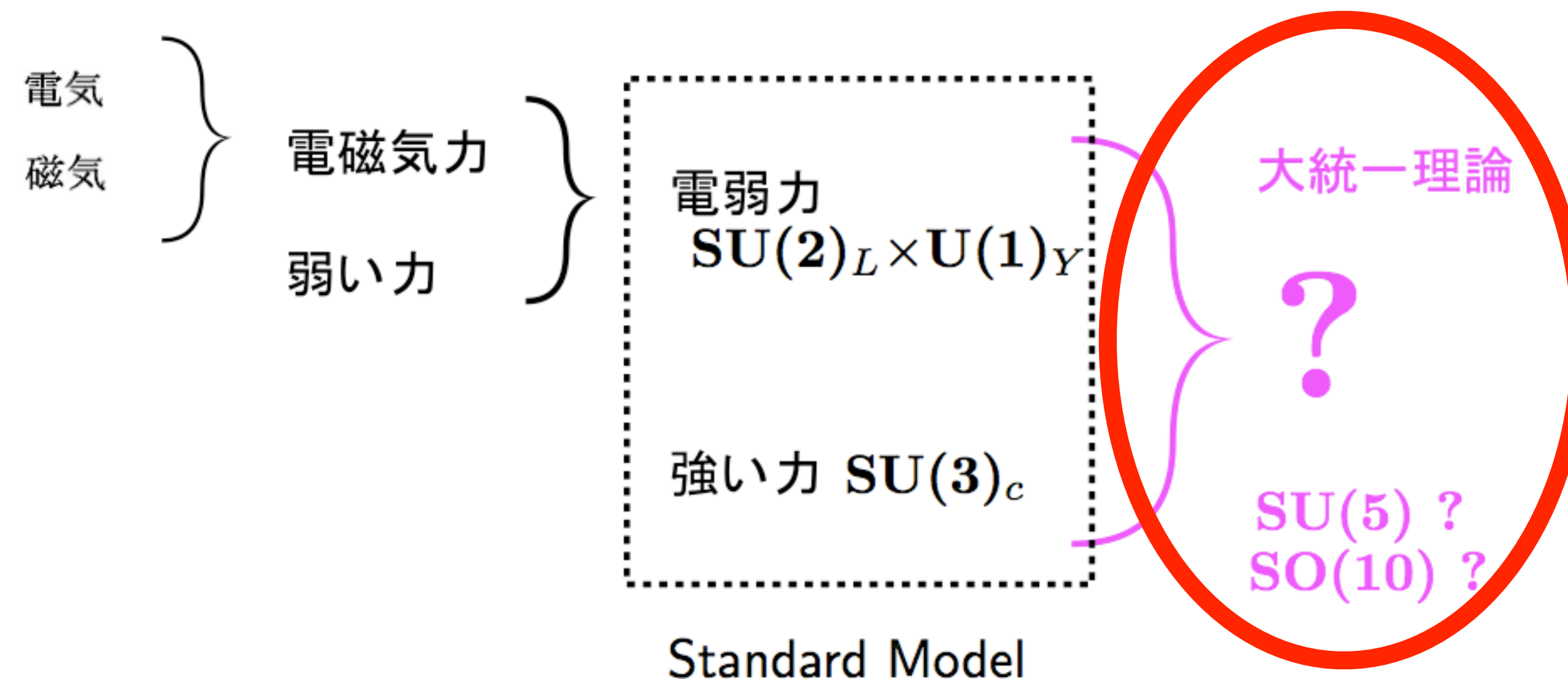
謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

おそらくこの謎の答えは・・・



謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

標準模型ではクォーク・レプトンはバラバラ

$$\begin{pmatrix} \text{u} \\ \text{d} \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \text{u} \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \text{d} \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \text{e} \\ \nu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \text{e} \end{pmatrix}_R$$

$(3, 2)_{+1/6} \quad (\bar{3}, 1)_{-2/3} \quad (\bar{3}, 1)_{+1/3} \quad (1, 2)_{-1/2} \quad (1, 1)_{+1}$

$$1/3 + 1/3 + 1/3 - 1/2 - 1/2 = 0$$

大統一理論では . . . (SU(5)大統一理論の場合)

$$\begin{pmatrix} \text{u} \\ \text{d} \end{pmatrix}_L \quad \text{u}_R \quad \text{e}_R \quad \begin{pmatrix} \text{e} \\ \nu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \text{d} \end{pmatrix}_R$$

10 5

[Georgi, Glashow 1974]

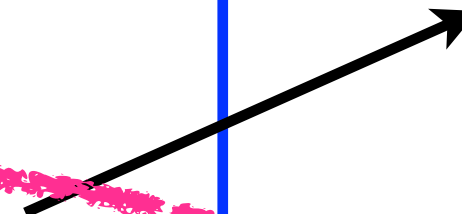
標準模型を超える物理の動機／ヒント

宇宙

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

大統一理論

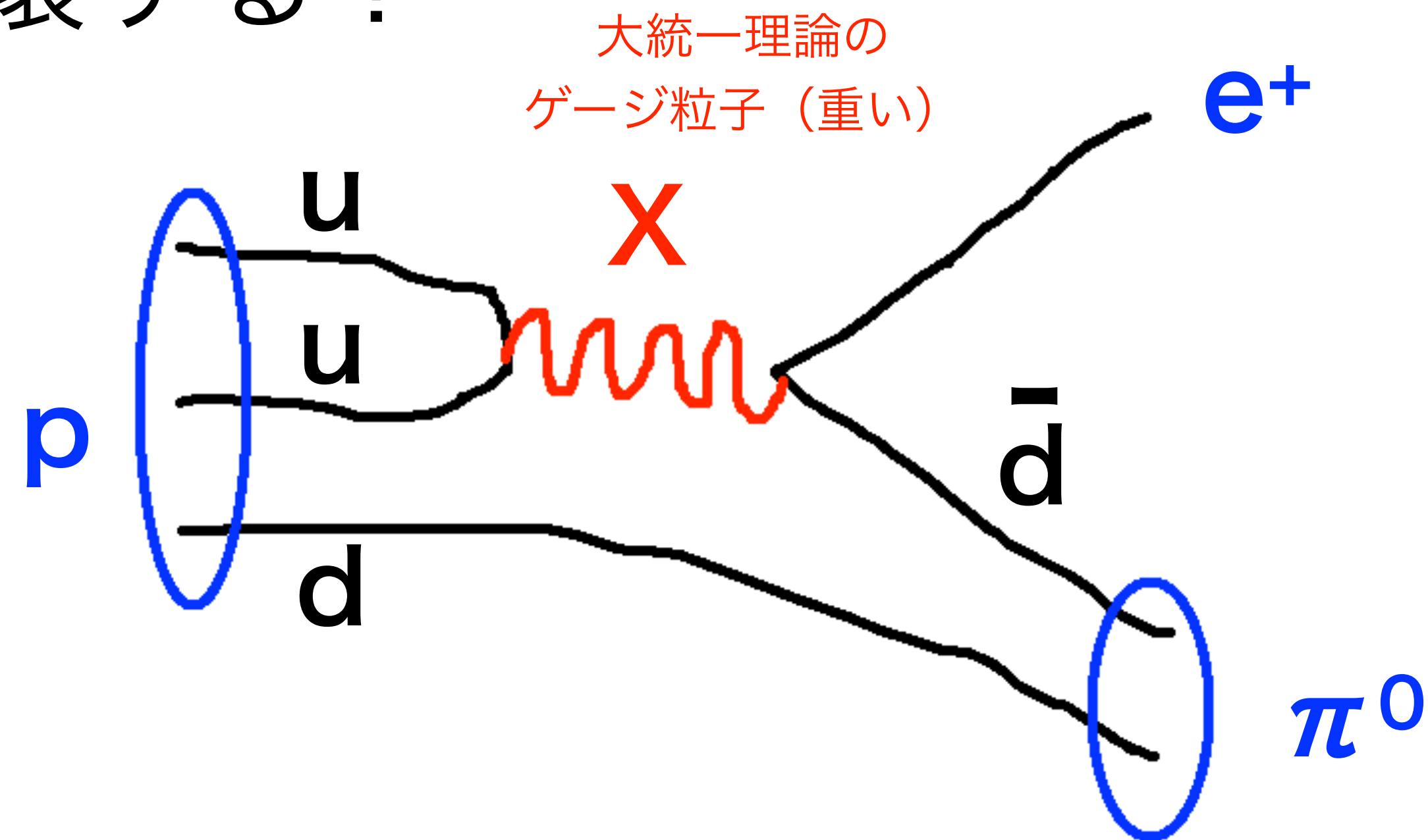


「大統一理論」の予言は？

「大統一理論」の予言は？

予言① もし「大統一理論」が正しい理論なら・・・

陽子が崩壊する！



でも寿命の予言は大統一理論の模型によって大きく異なります。

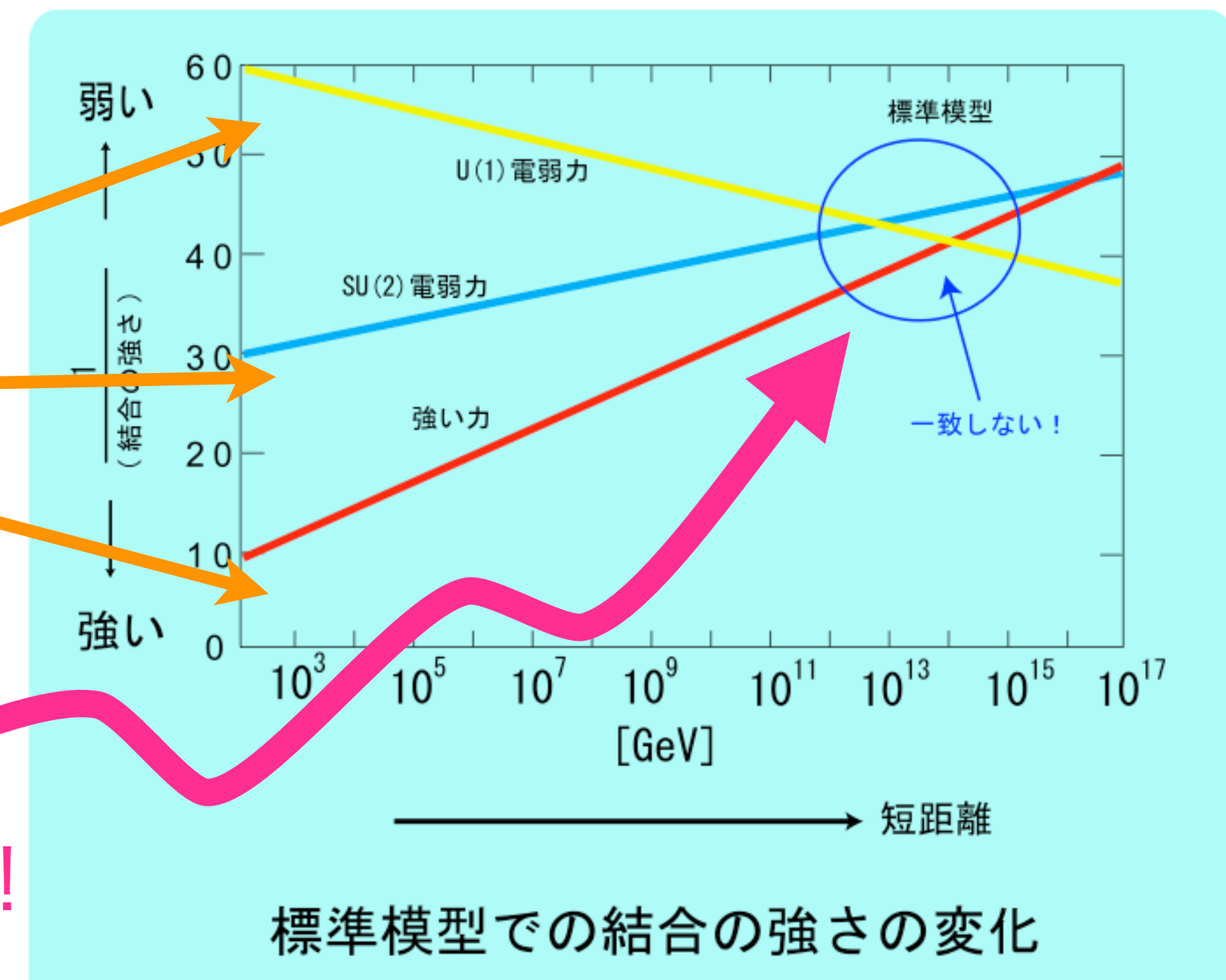
~~(理論屋さんは好き勝手なことを言うので・・・)~~

「大統一理論」の予言は？

予言② もし「大統一理論」が正しい理論なら・・・

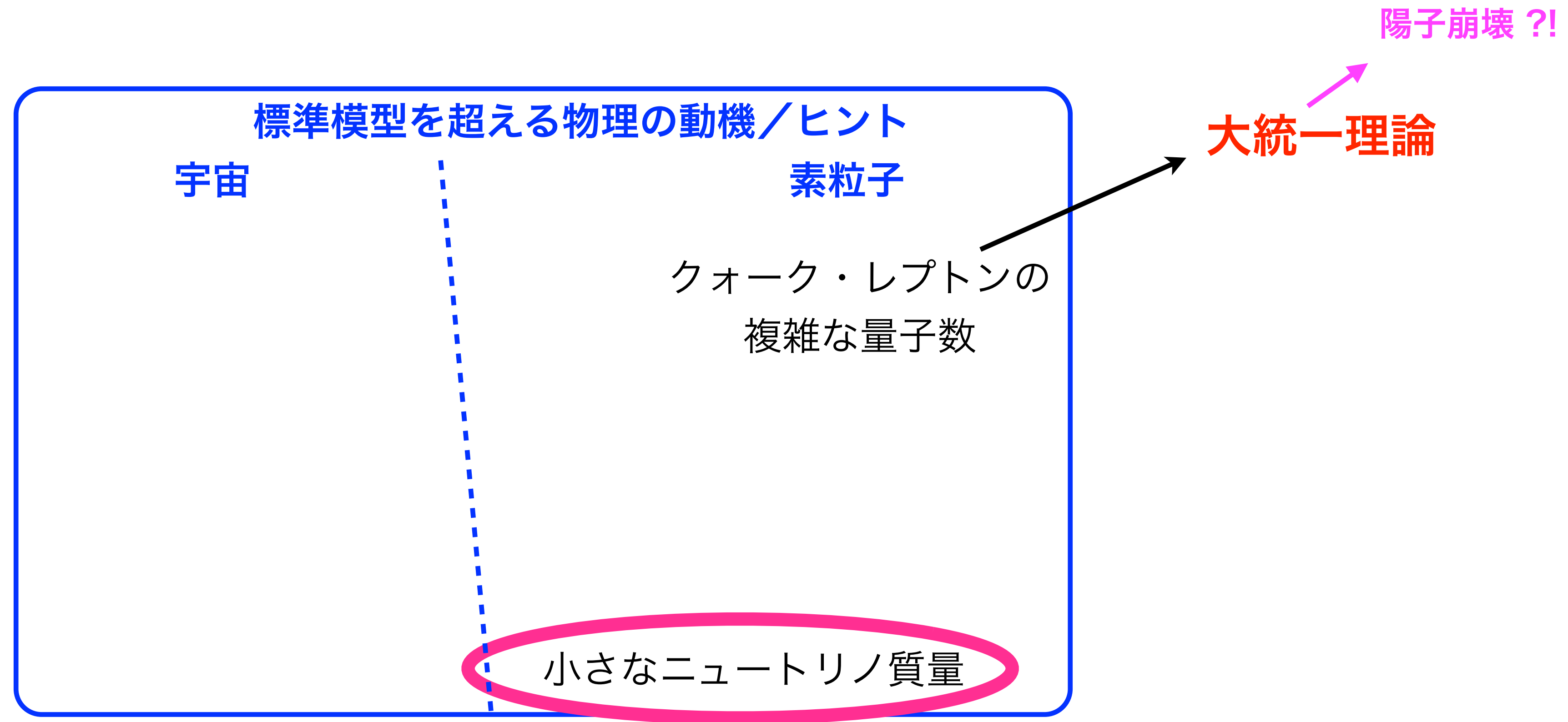
非常に短距離（＝非常に高いエネルギー）で3つの結合定数が一致する。

3つの力



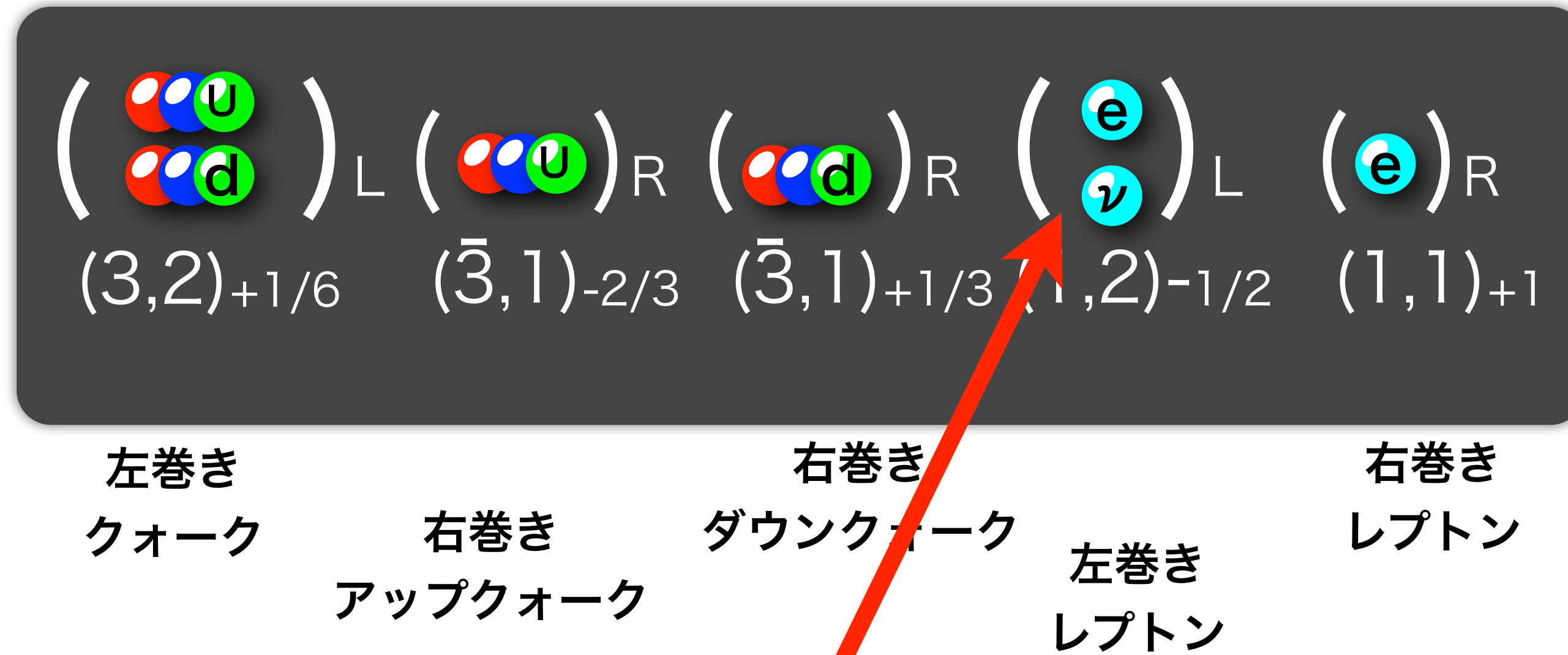
よく見るとちゃんと一致してない！

・・・これについては後ほど。



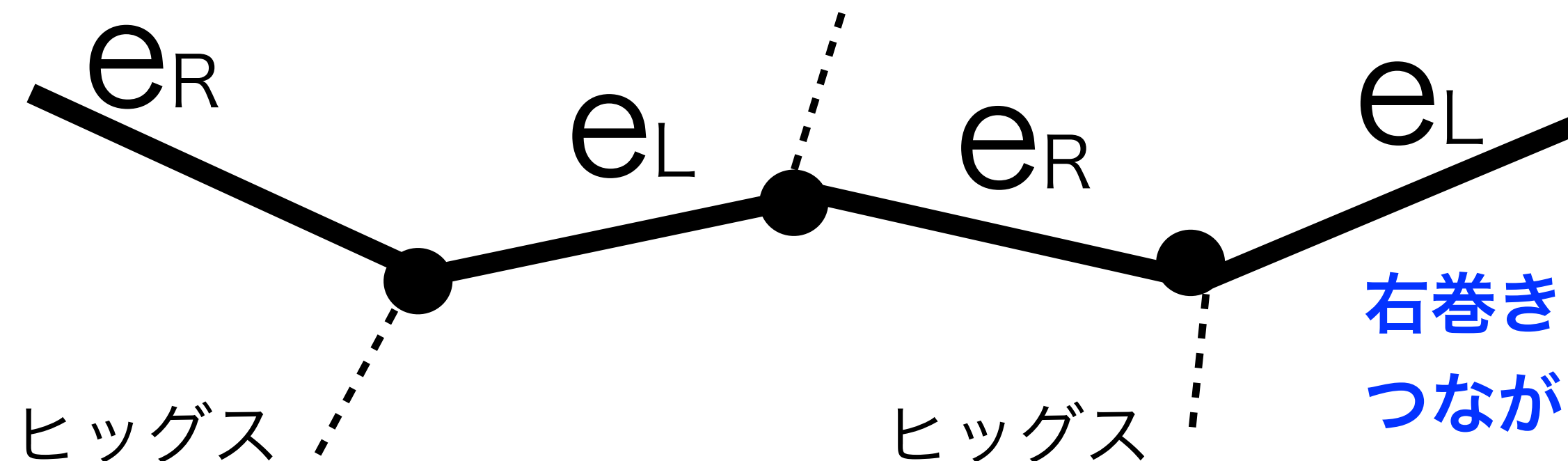
次は・・・

謎：ニュートリノの質量



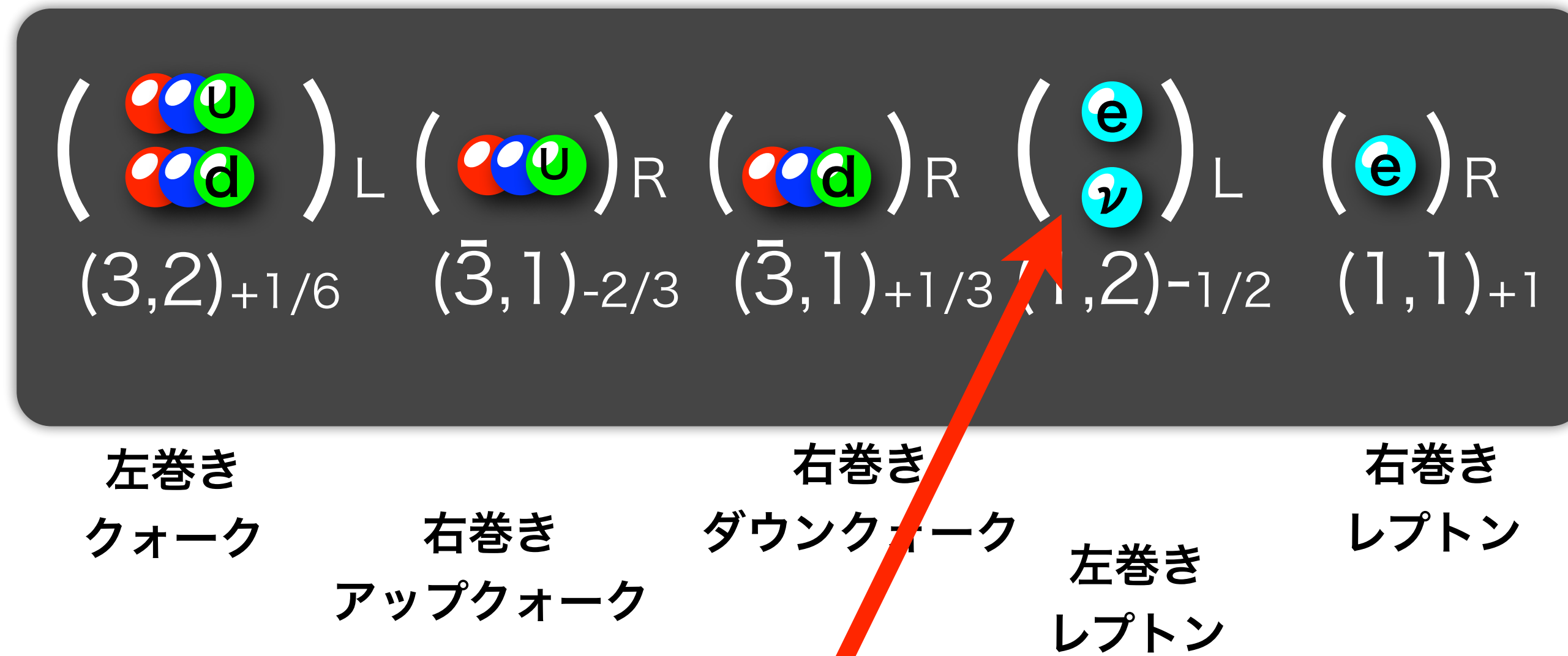
よく見るとニュートリノは左巻きしかない

再びヒッグスのところの電子の話を思い出すと・・・



右巻きと左巻きがヒッグスでつながることで「質量」を得る。

謎：ニュートリノの質量



よく見るとニュートリノは左巻きしかない
質量を持たない！（質量ゼロ）

・・・しかし、
ニュートリノは質量を持っている！



III: N. Elmehe. © Nobel Media 2015

2015 Nobel Prize
in Physics

謎：ニュートリノの質量

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ $(3, 2)_{+1/6}$
 u_R $(\bar{3}, 1)_{-2/3}$
 d_R $(\bar{3}, 1)_{+1/3}$
 $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$ $(1, 2)_{-1/2}$
 e_R $(1, 1)_{+1}$

左巻き クォーク
 右巻き アップクォーク
 右巻き ダウルクォーク
 左巻き レプトン
 右巻き レプトン

+ N $(1, 1)_0$ 右巻き ニュートリノ

解決方法は・・・

右巻きニュートリノを足してしまう

右巻きニュートリノ、実はすごい

右巻きニュートリノ、実はすごい

① クォーク・レプトンがさらに統一

$$\left(\begin{array}{ccc} \text{u} & & \\ \text{d} & & \end{array} \right)_L \quad \text{u}_R \quad \text{e}_R \quad \left(\begin{array}{c} \text{e} \\ \nu \end{array} \right)_L \quad \text{d}_R \quad \text{SU}(5) \text{ 大統一} \quad + \quad \begin{array}{c} \text{N} \\ (1,1)_0 \end{array}$$

10 5

$$= \left(\begin{array}{cccccc} \text{u} & & & \text{e} & & \\ \text{d} & & & \nu & & \end{array} \right)_L \quad \text{u}_R \quad \text{e}_R \quad \text{d}_R \quad \text{N}_1 \text{R} \quad \text{SO}(10) \text{ 大統一}$$

16

全てのクォーク
レプトンが統一！

右巻きニュートリノ、実はすごい

① クォーク・レプトンがさらに統一

=

16

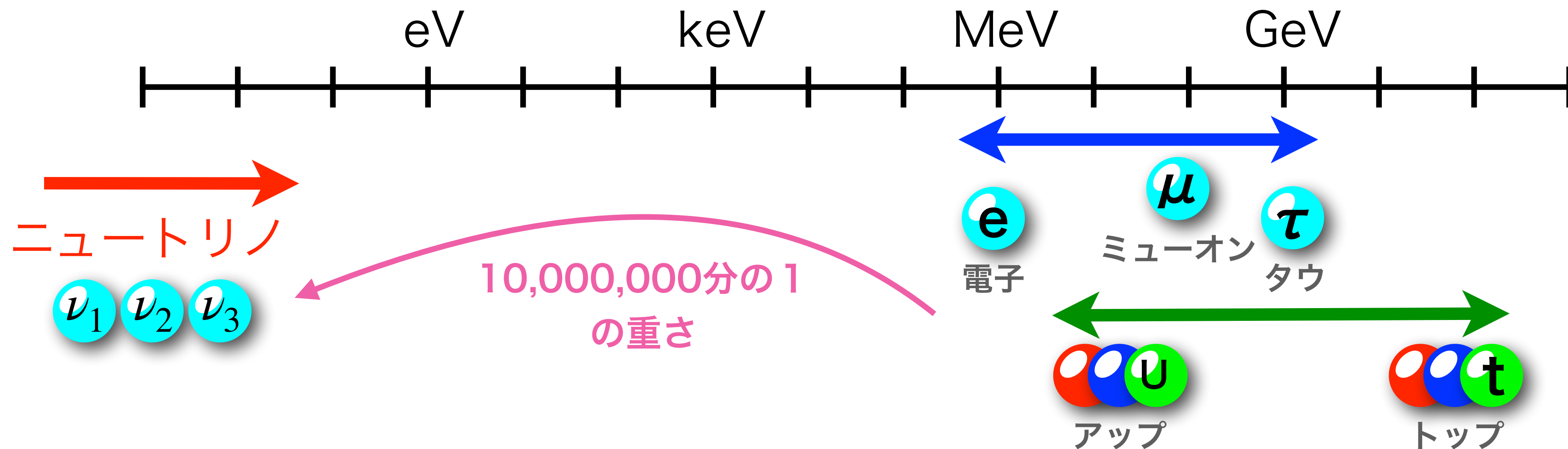
=

(↑	↓	↓	↓	↑)
(↑	↓	↓	↑	↓)
(↑	↓	↑	↓	↓)
(↓	↑	↓	↓	↑)
(↓	↑	↓	↑	↓)
(↓	↑	↑	↓	↓)
(↑	↑	↑	↑	↓)
(↑	↑	↑	↓	↑)
(↑	↑	↓	↑	↑)
(↓	↓	↑	↑	↓)
(↓	↓	↑	↓	↑)
(↓	↓	↓	↑	↑)
(↑	↓	↑	↑	↑)
(↓	↑	↑	↑	↑)
(↑	↑	↓	↓	↓)
(↓	↓	↓	↓	↓)

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明

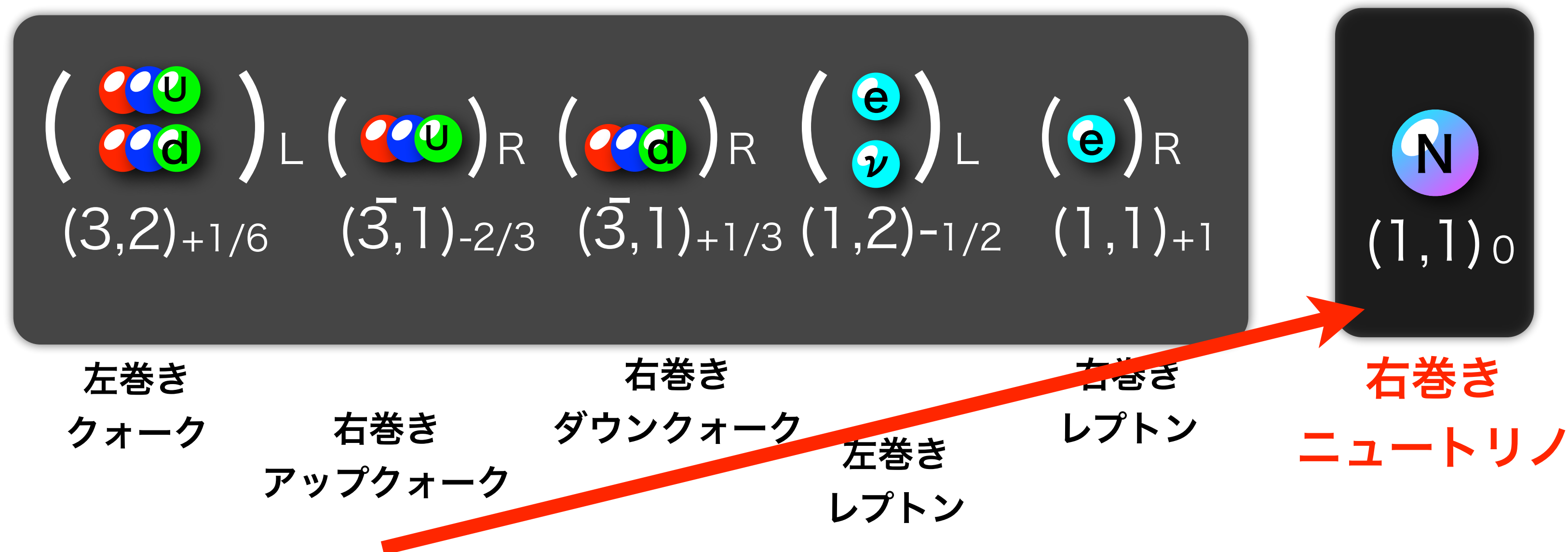
クォーク、レプトンの質量



・・・何でニュートリノだけこんなに軽いのか？

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明

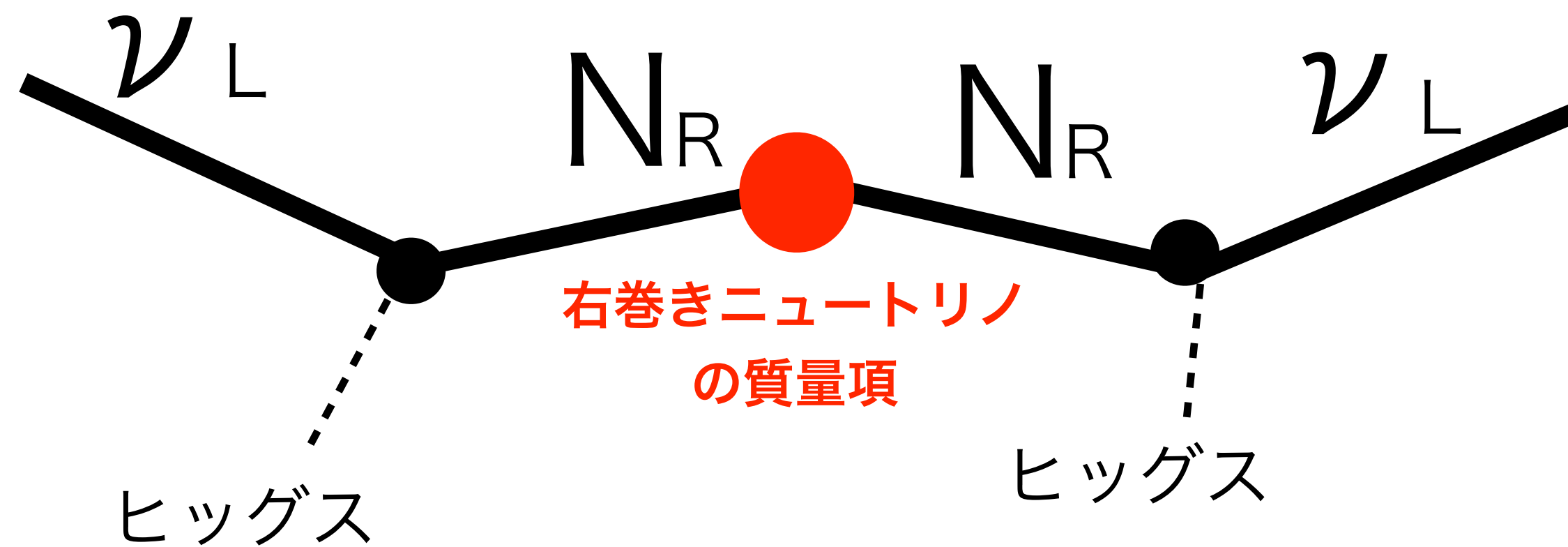


実はこいつだけ特別！ 電磁気・弱い力・強い力どれとも反応しない。

- 電荷を全く持っていない。
- 自分自身の反粒子になれる。
- 自分だけで質量を持てる！

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明



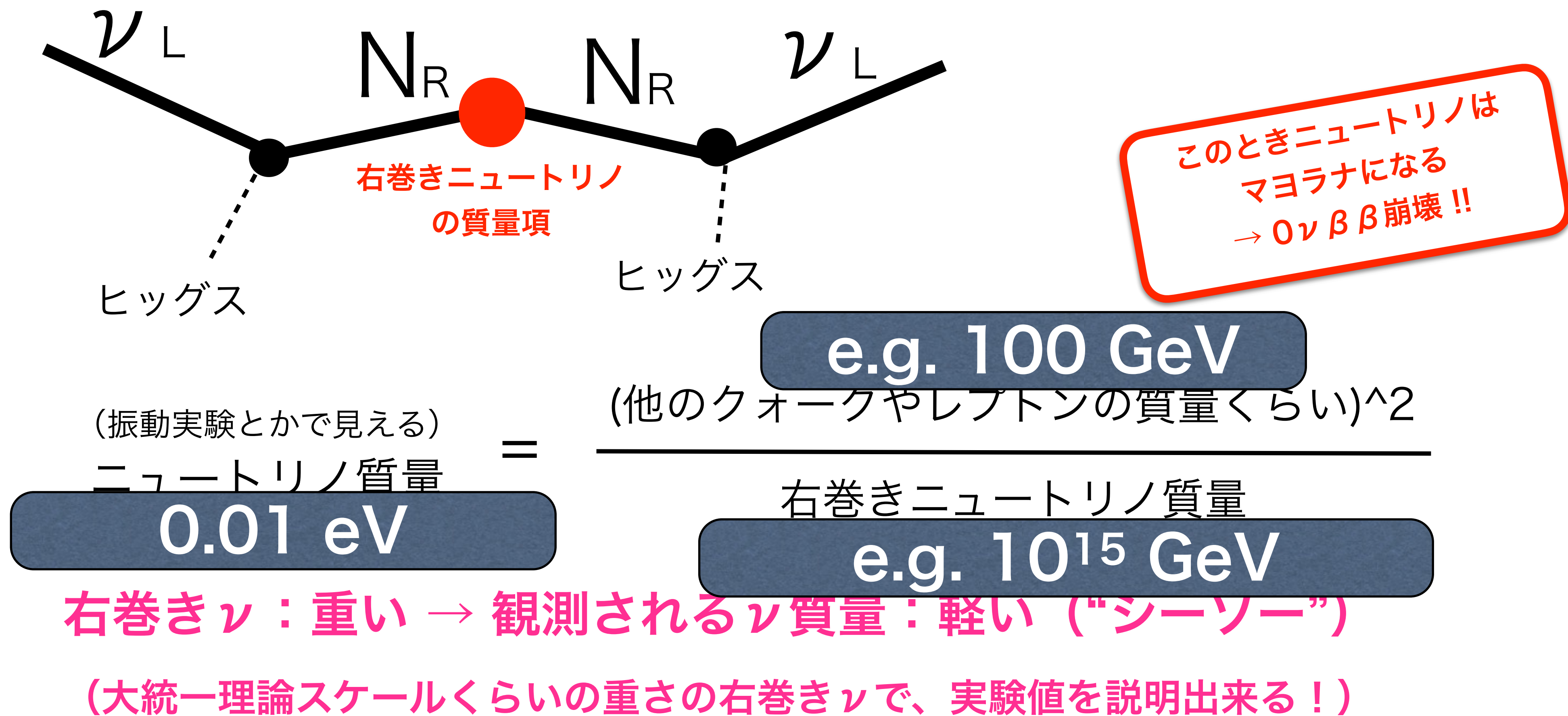
$$\begin{array}{l} \text{(振動実験とかで見える)} \\ \text{ニュートリノ質量} \end{array} = \frac{\text{(他のクォークやレプトンの質量くらい)}^2}{\text{右巻きニュートリノ質量}}$$

右巻き ν ：重い $\rightarrow$ 観測される ν 質量：軽い (“シーソー”)

(大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る！)

右巻きニュートリノ、実はすごい

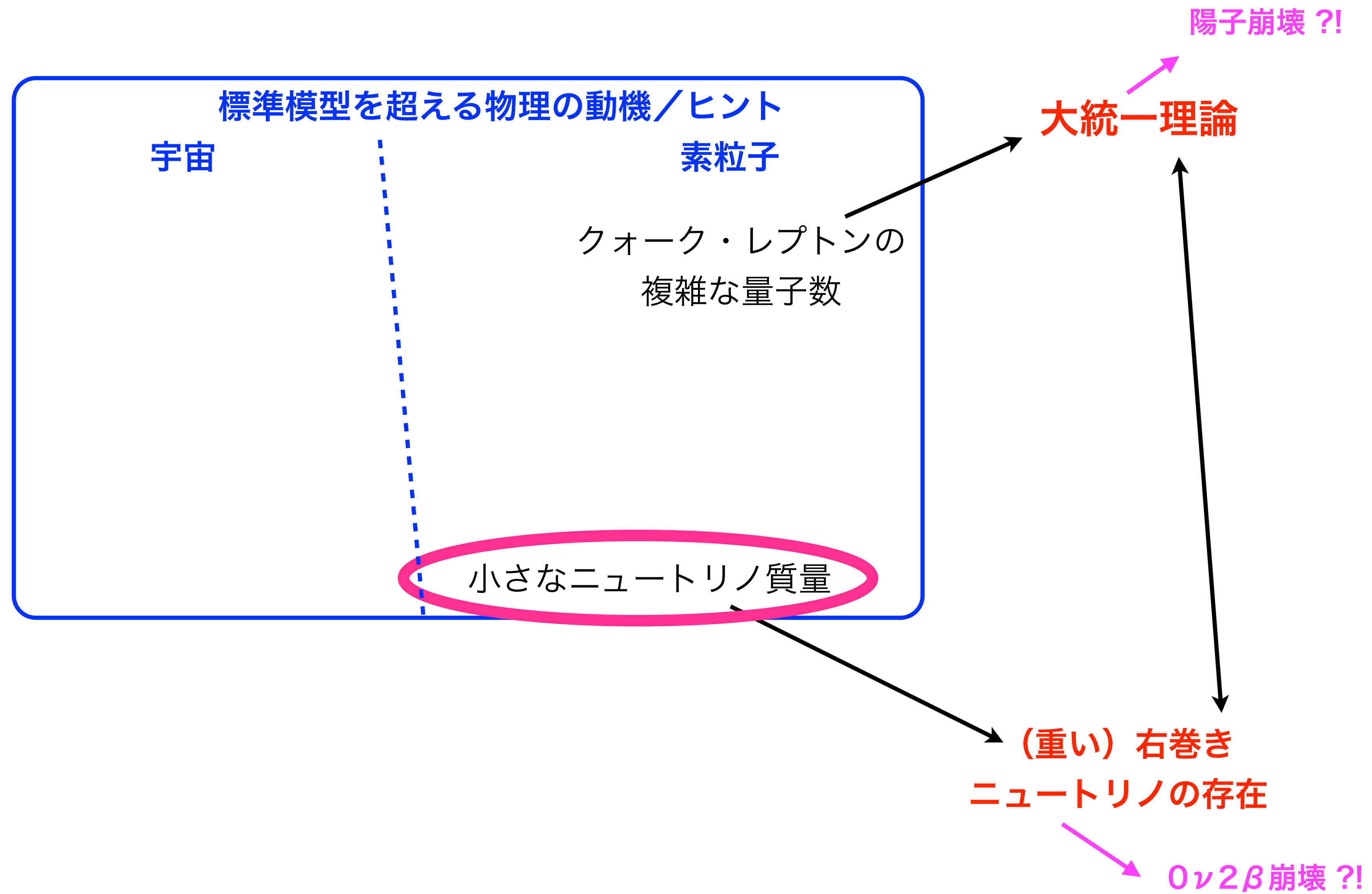
② 小さなニュートリノ質量を説明



右巻きニュートリノ、実はすごい

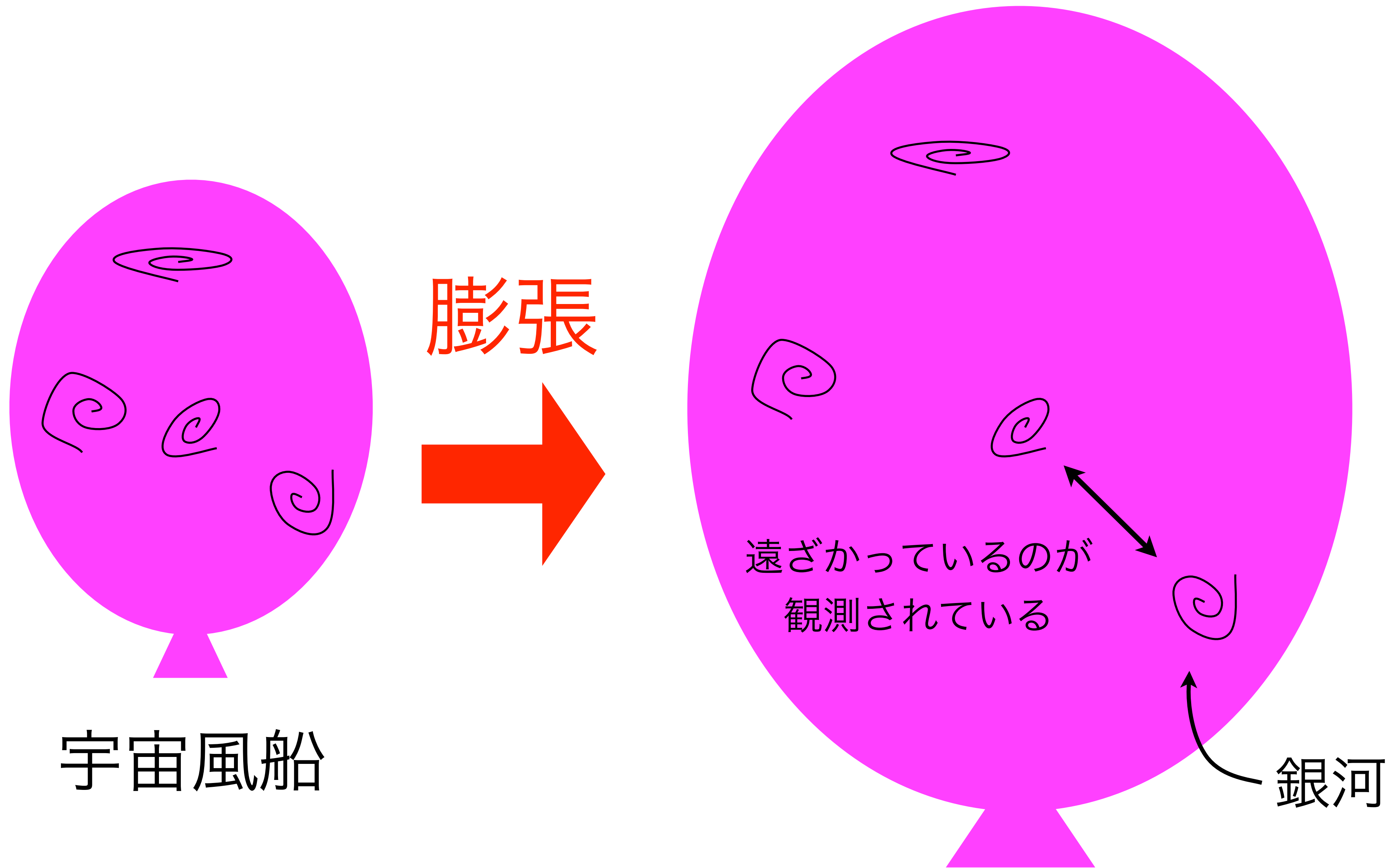
③ 宇宙の物質＞反物質を・・・

・・・これについては後ほど。



◆ 話はがらっと変わって・・・

宇宙は膨張している。

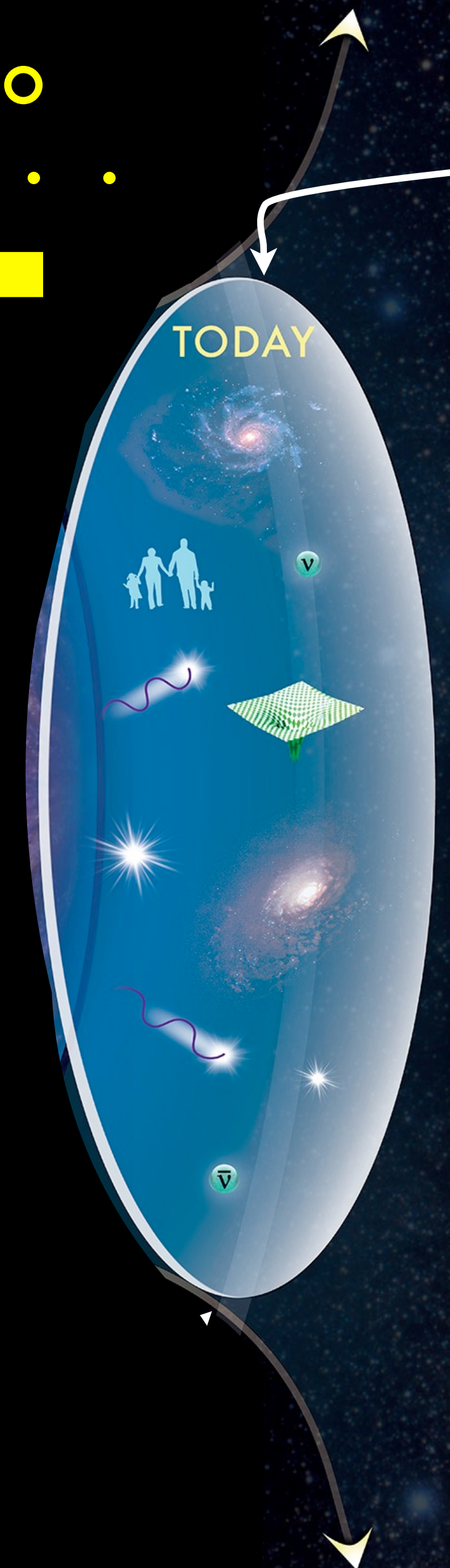


宇宙は膨張している。

時間を巻き戻すと・・・



現在の宇宙

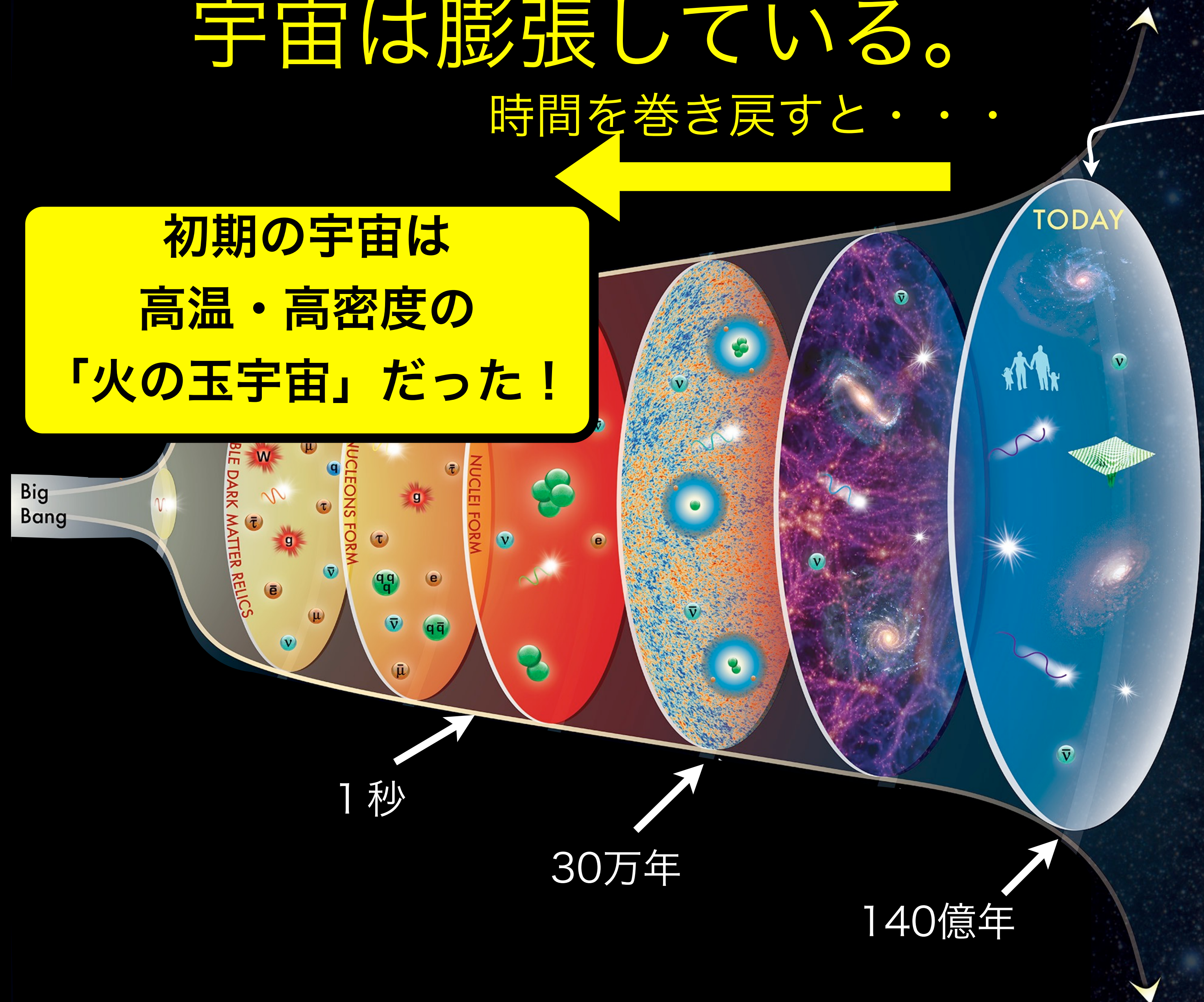


宇宙は膨張している。

時間を巻き戻すと・・・

現在の宇宙

初期の宇宙は
高温・高密度の
「火の玉宇宙」だった！



宇宙は膨張している。

時間を巻き戻すと・・・

現在の宇宙

初期の宇宙は
高温・高密度の
「火の玉宇宙」だった！

証拠あります！

ホント??
証拠はあるの???



1 秒

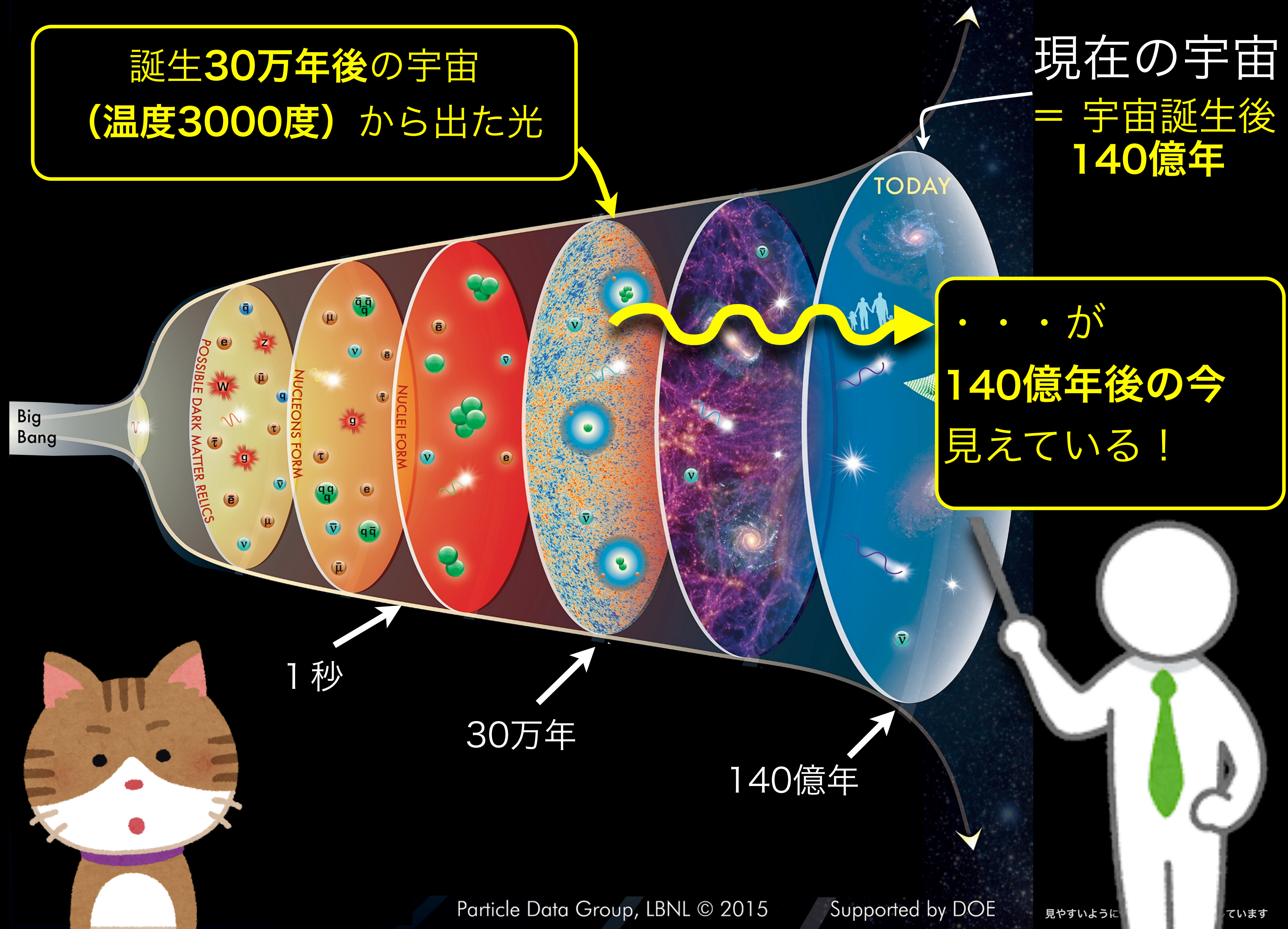
30万年

140億年



誕生30万年後の宇宙
(温度3000度) から出た光

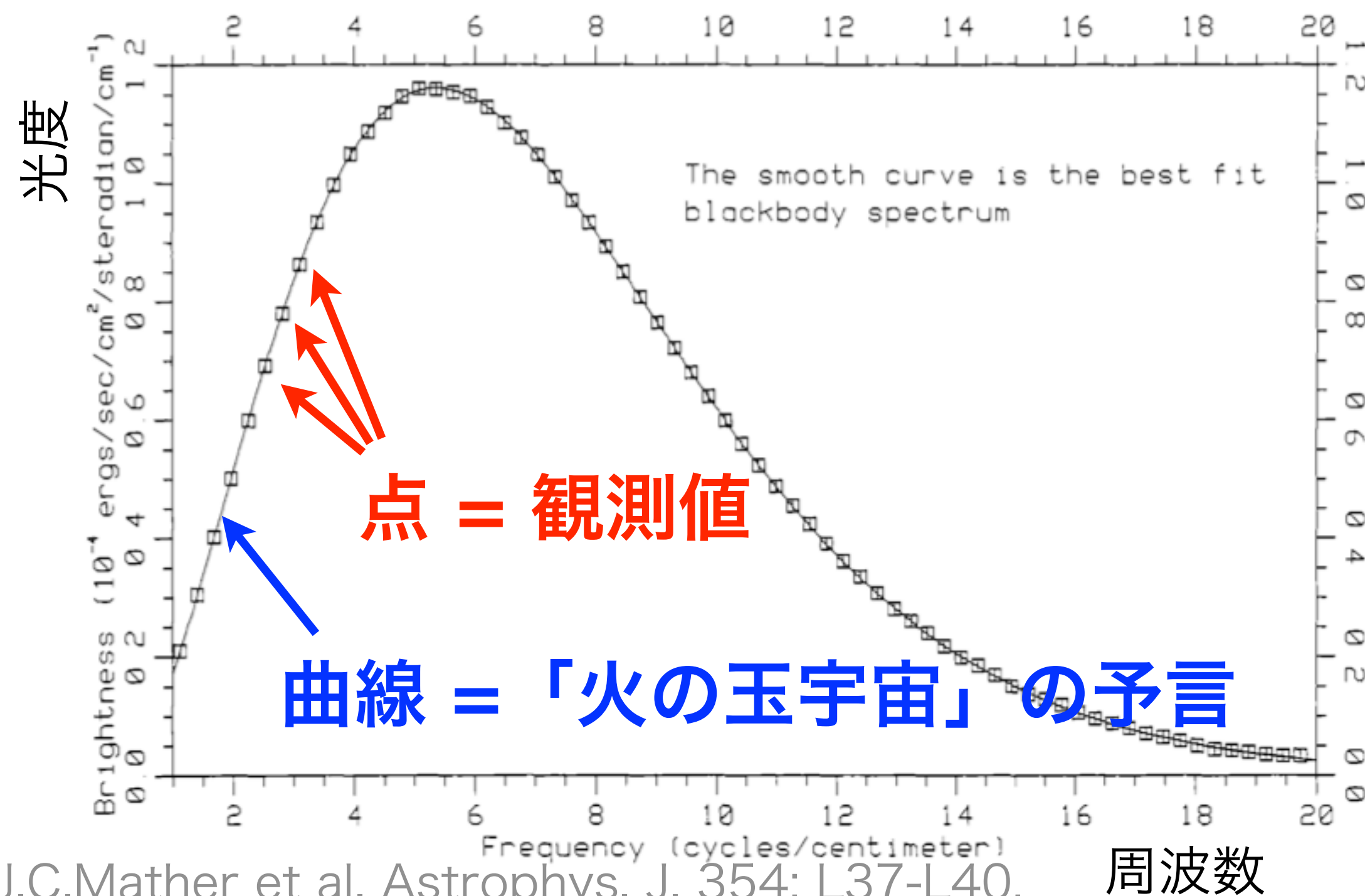
現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年



誕生30万年後の宇宙
(温度3000度) から出た光

現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年

宇宙背景放射



J.C.Mather et al. Astrophys. J. 354: L37-L40,
1990

・・・が
140億年後の今
見えている！

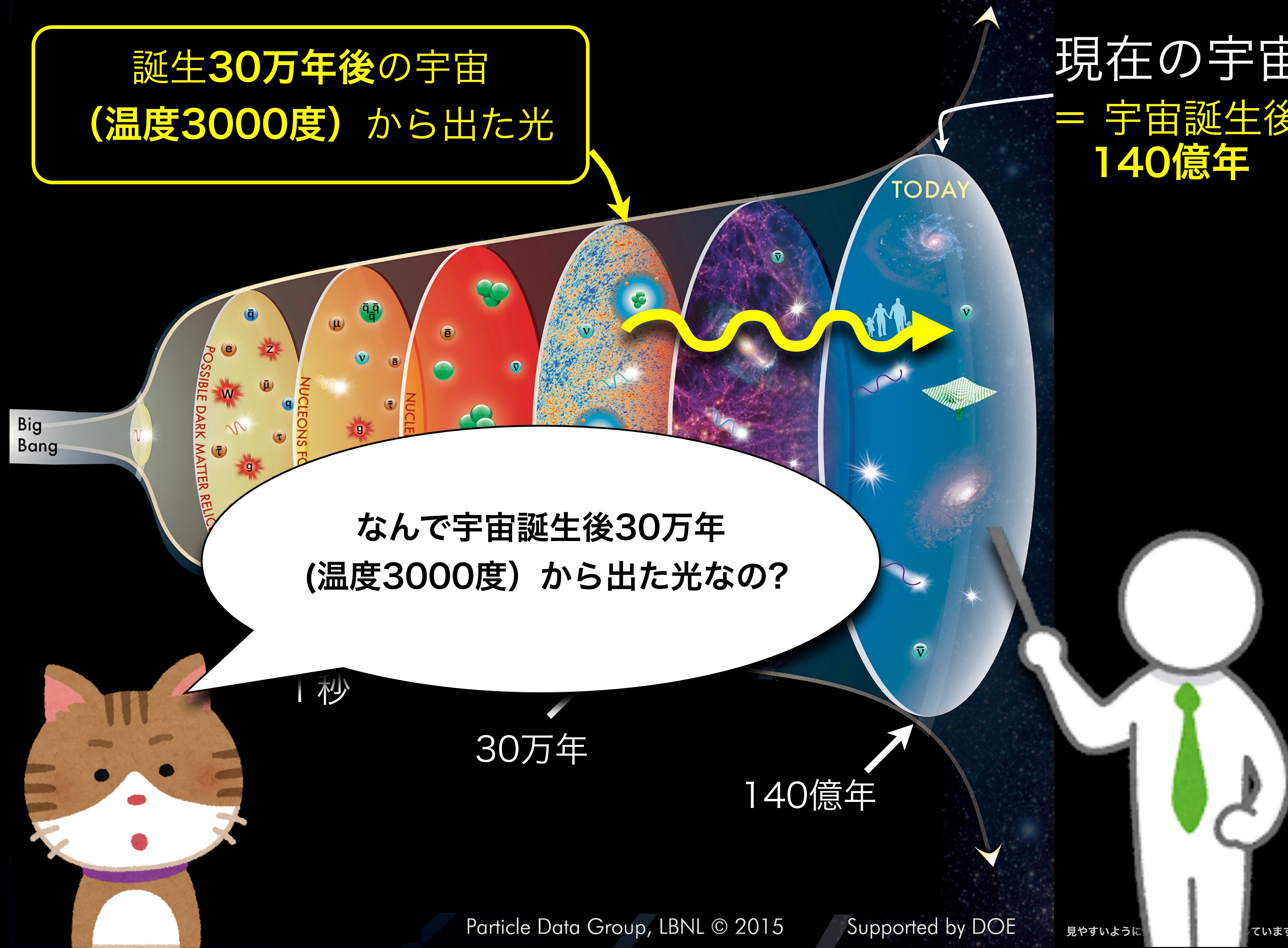
億年

Supported by DOE

見やすいようにしています

誕生30万年後の宇宙
(温度3000度) から出た光

現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年



なんで宇宙誕生後30万年
(温度3000度) から出た光なの?

30万年

140億年

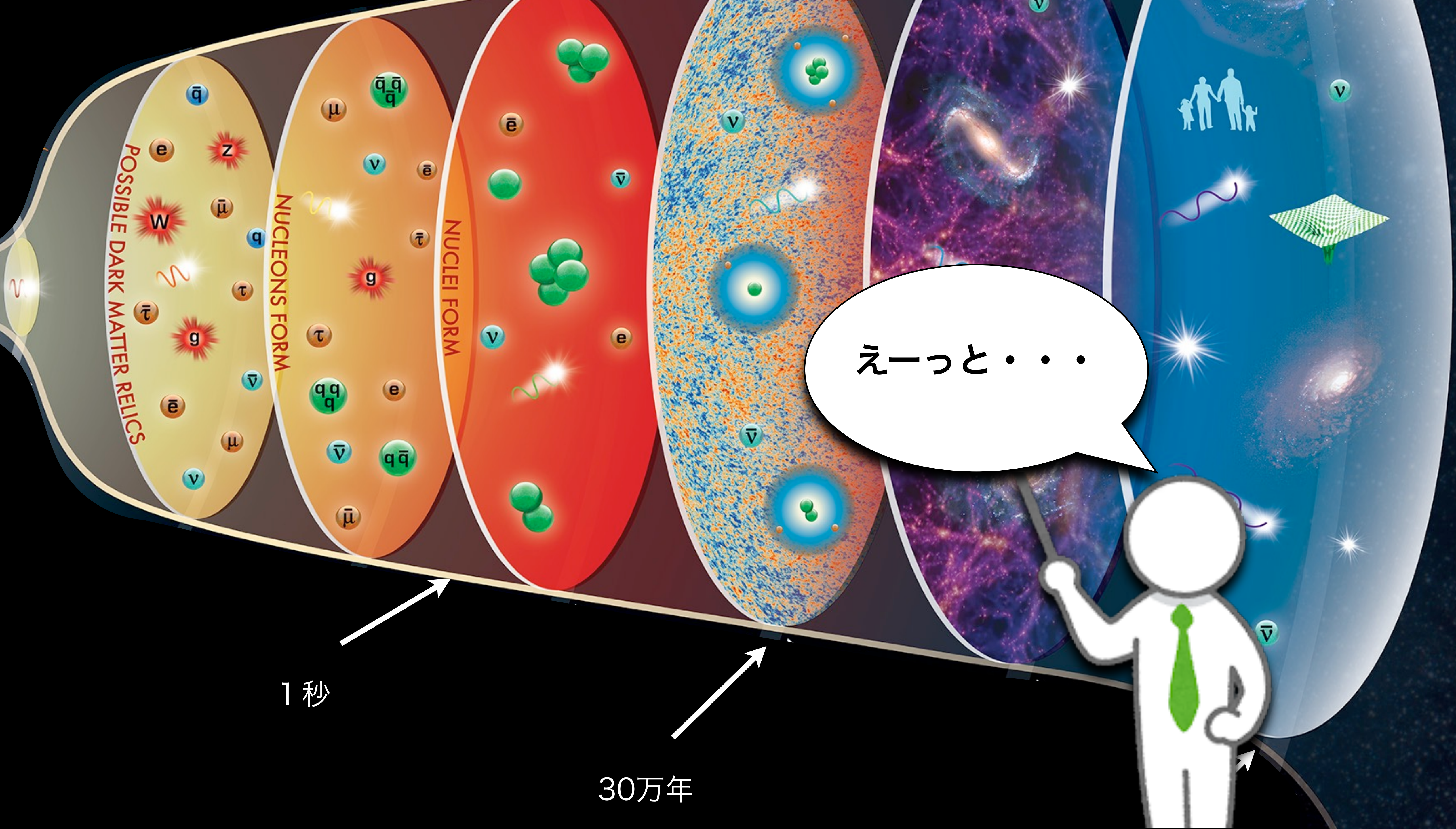
誕生30万年後の宇宙
(温度3000度) から出た光

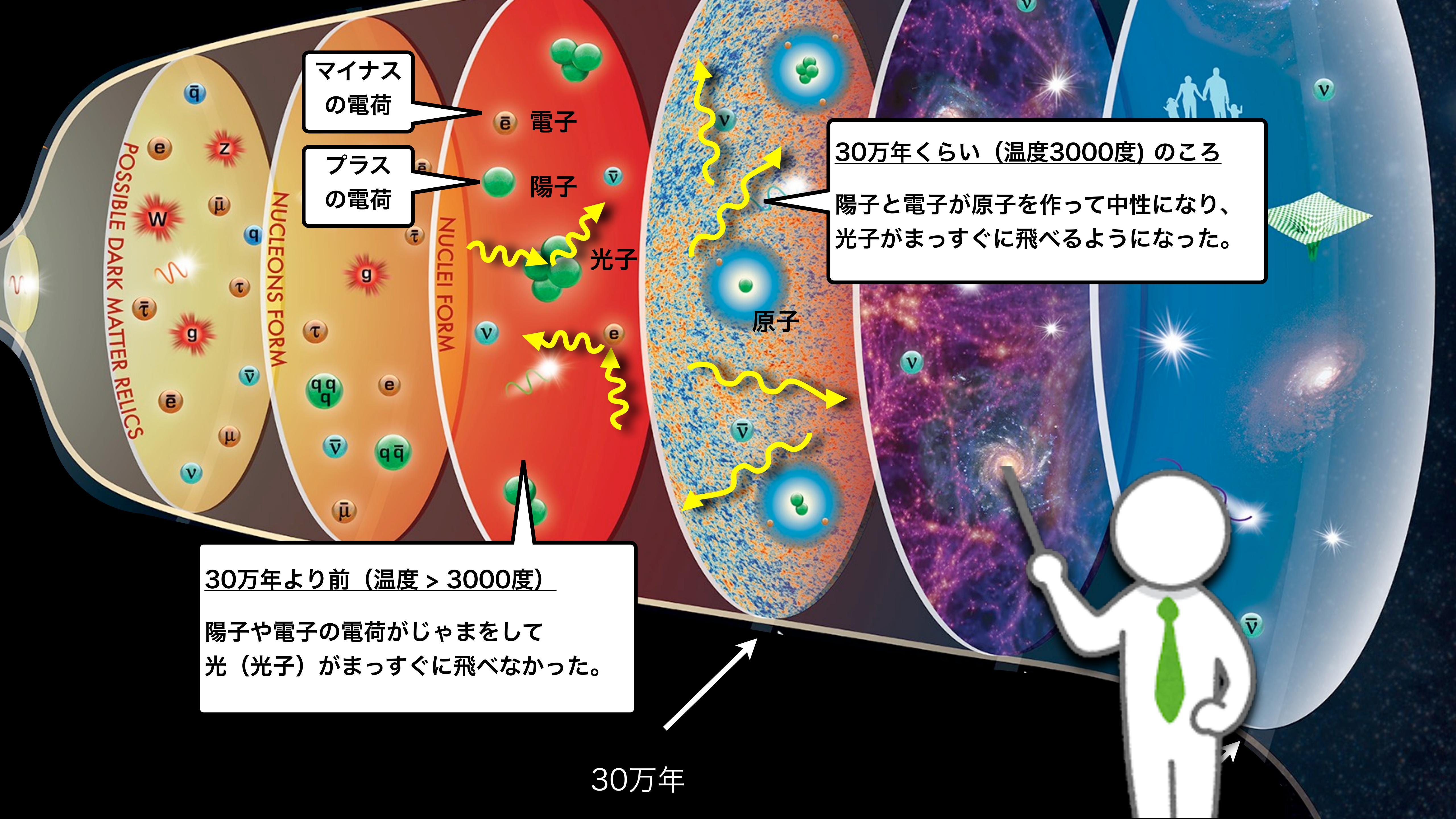
現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年



なんで宇宙誕生後30万年
(温度3000度) から出た光なの？







マイナス
の電荷

プラス
の電荷

e^- 電子

陽子

光子

原子

30万年くらい (温度3000度) のころ
陽子と電子が原子を作って中性になり、
光子がまっすぐに飛べるようになった。

30万年より前 (温度 > 3000度)
陽子や電子の電荷がじゃまをして
光 (光子) がまっすぐに飛べなかった。

誕生30万年後の宇宙
(温度3000度) から出た光

現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年

Big
Bang

なるほど・

じゃあどこまで時間を
さかのぼって証拠があるの？

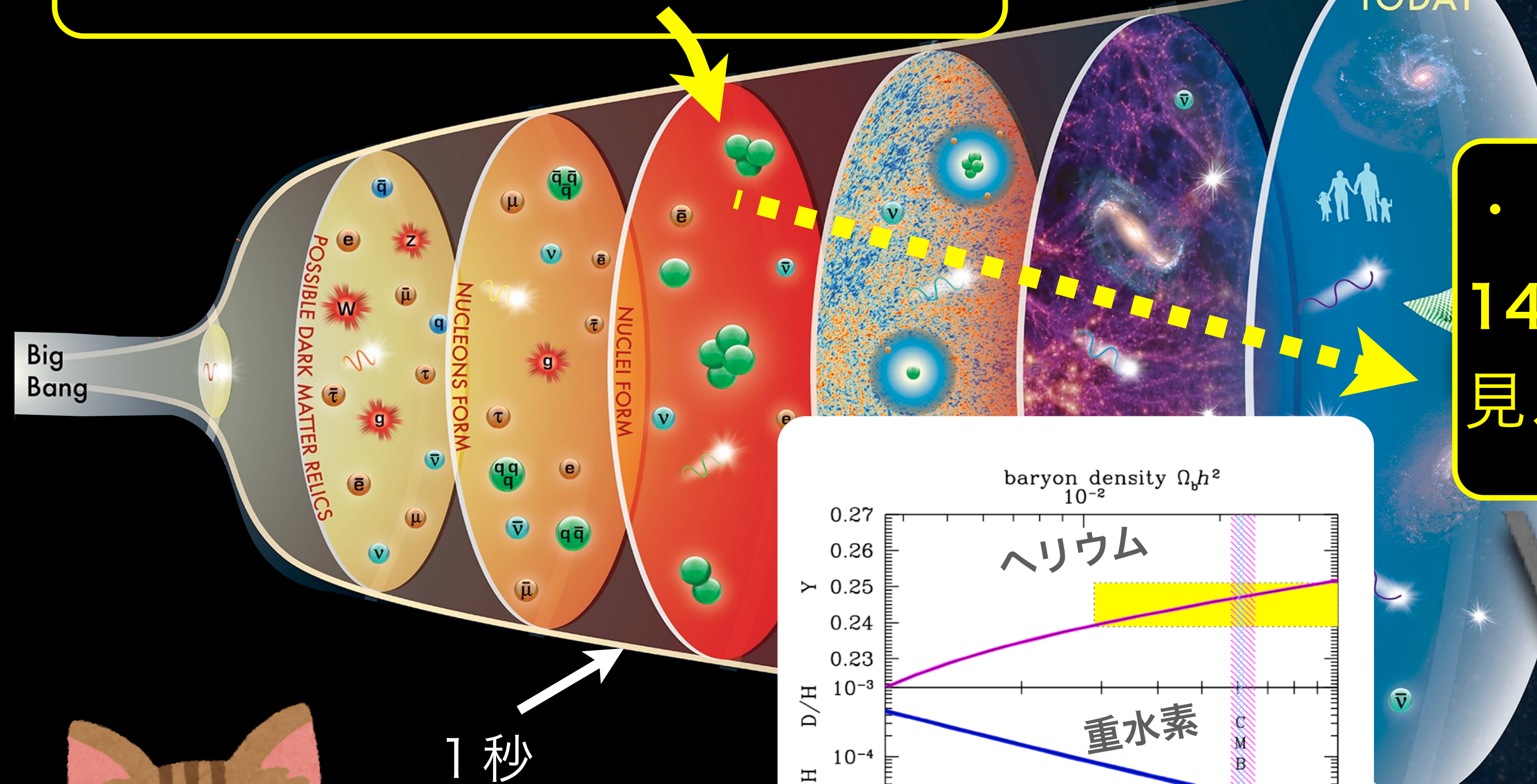
・・・が
140億年後の今
見えている！

140億年

TODAY

誕生1秒後～3分後の宇宙
(温度100億度) で作られた
軽元素 (ヘリウムとか)

現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年

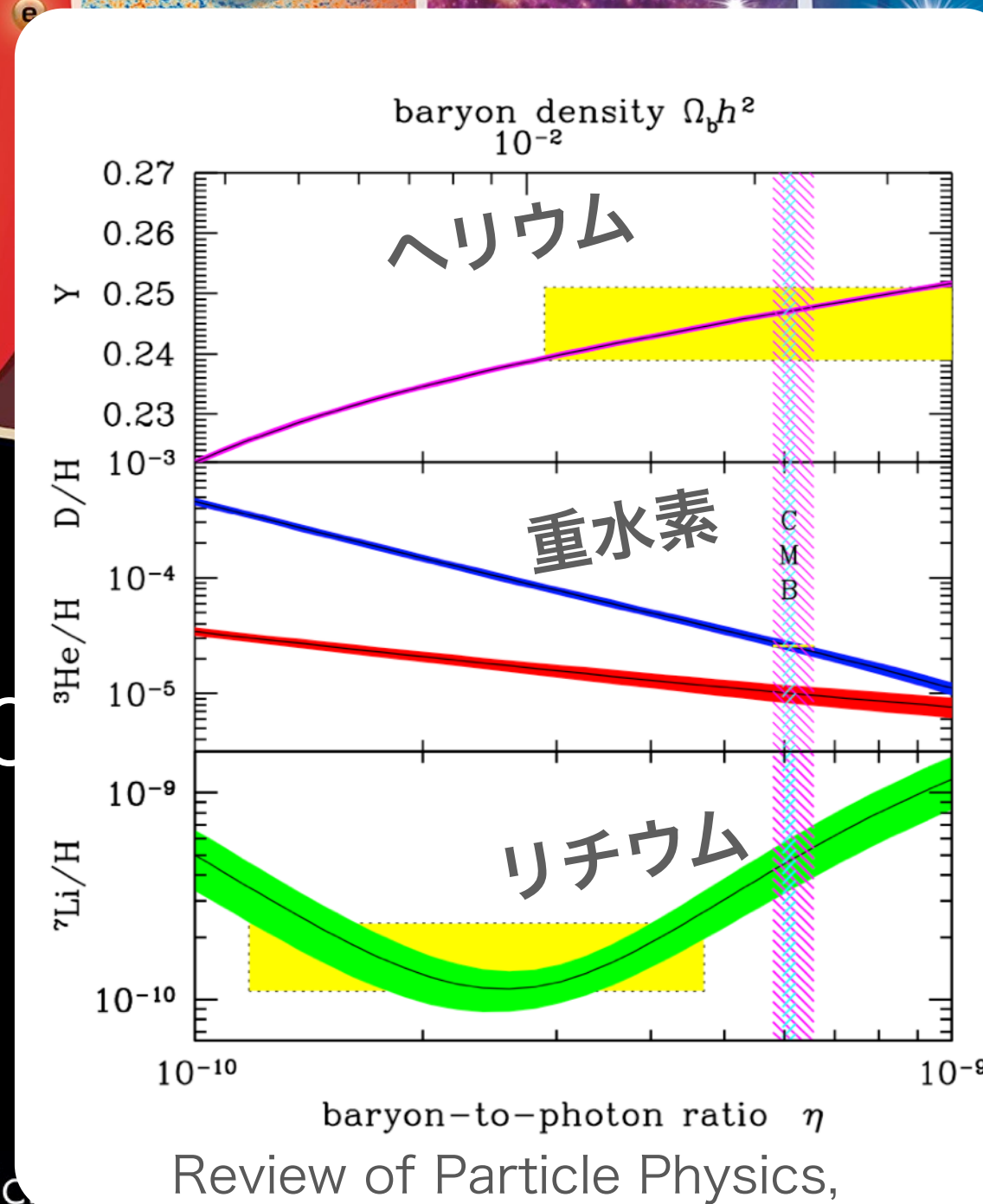


・・・が
140億年後の今
見えている！



1 秒

30

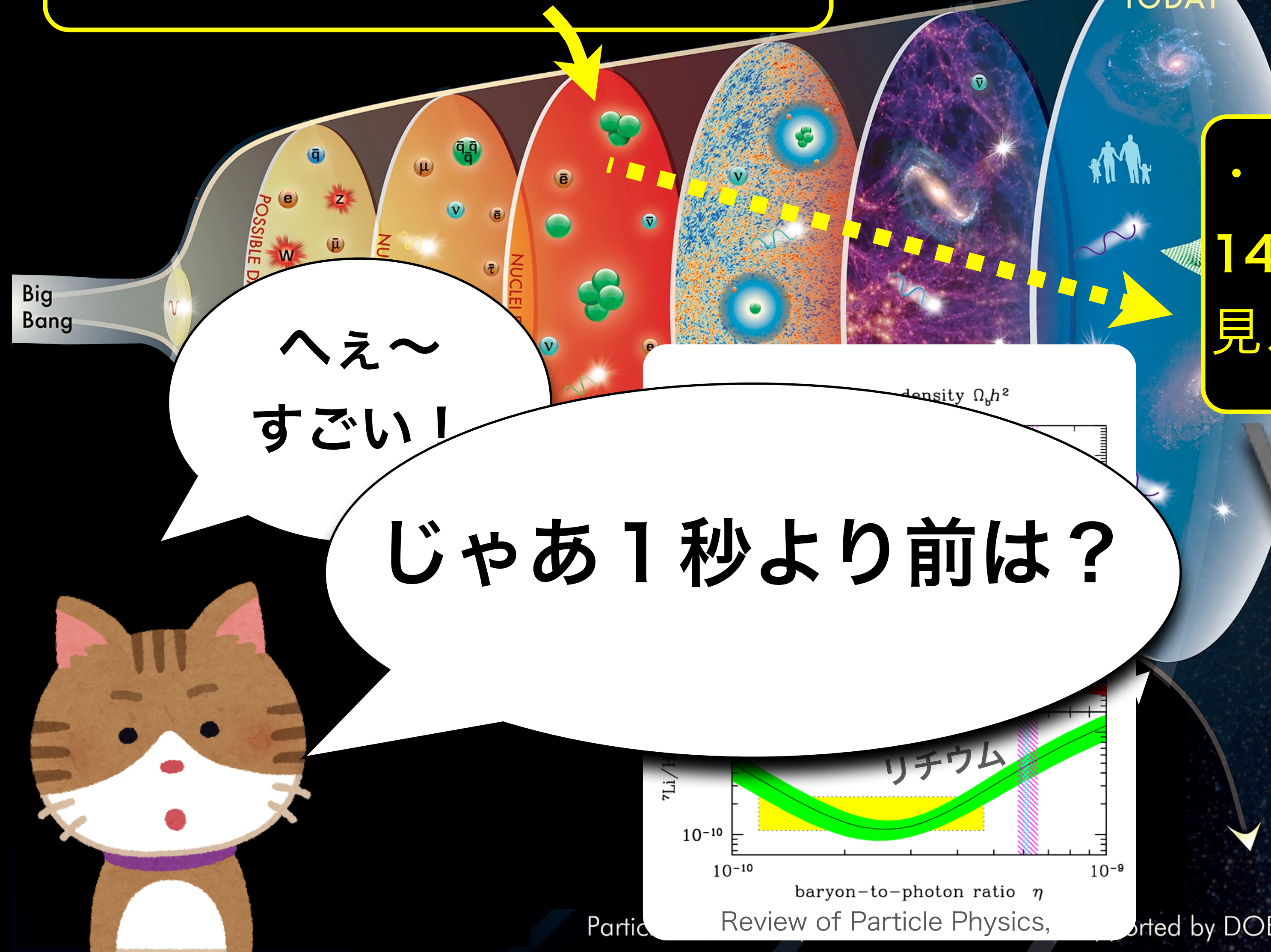


Particle Review of Particle Physics, supported by DOE

見やすいようにしています

誕生1秒後～3分後の宇宙
(温度100億度) で作られた
軽元素 (ヘリウムとか)

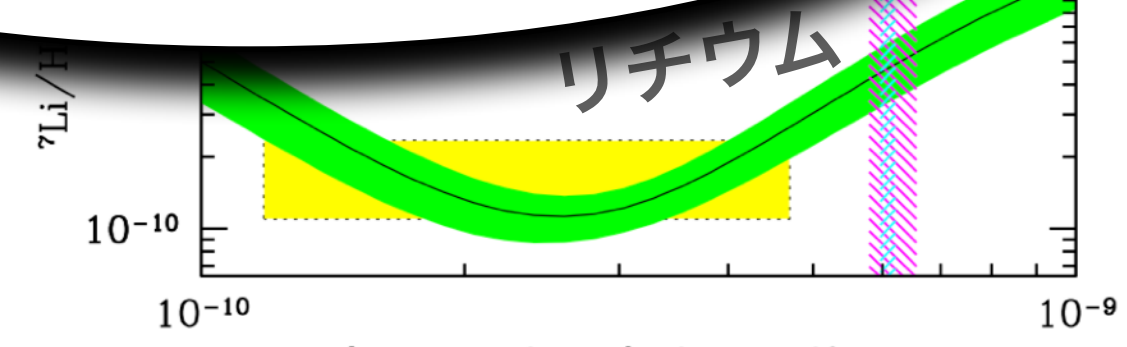
現在の宇宙
= 宇宙誕生後
140億年



・・・が
140億年後の今
見えている！

へえ～
すごい！

じゃあ1秒より前は？



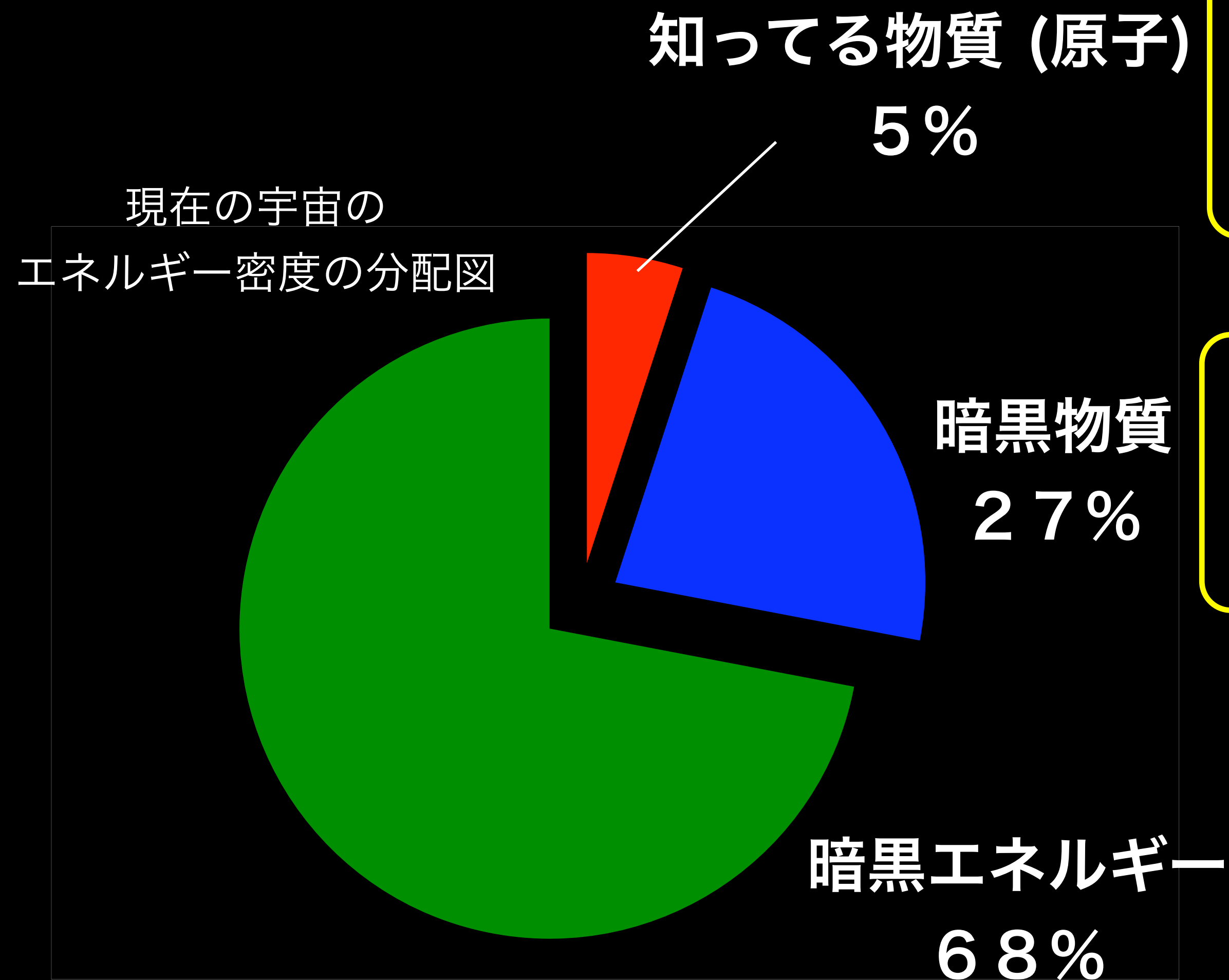
Review of Particle Physics, supported by DOE

見やすいようにしています

宇宙誕生後最初の１秒に何が起きたか
直接的な証拠はない。

しかしこの１秒の事を理解しないと
解けない謎がある・・・。

宇宙に残された謎



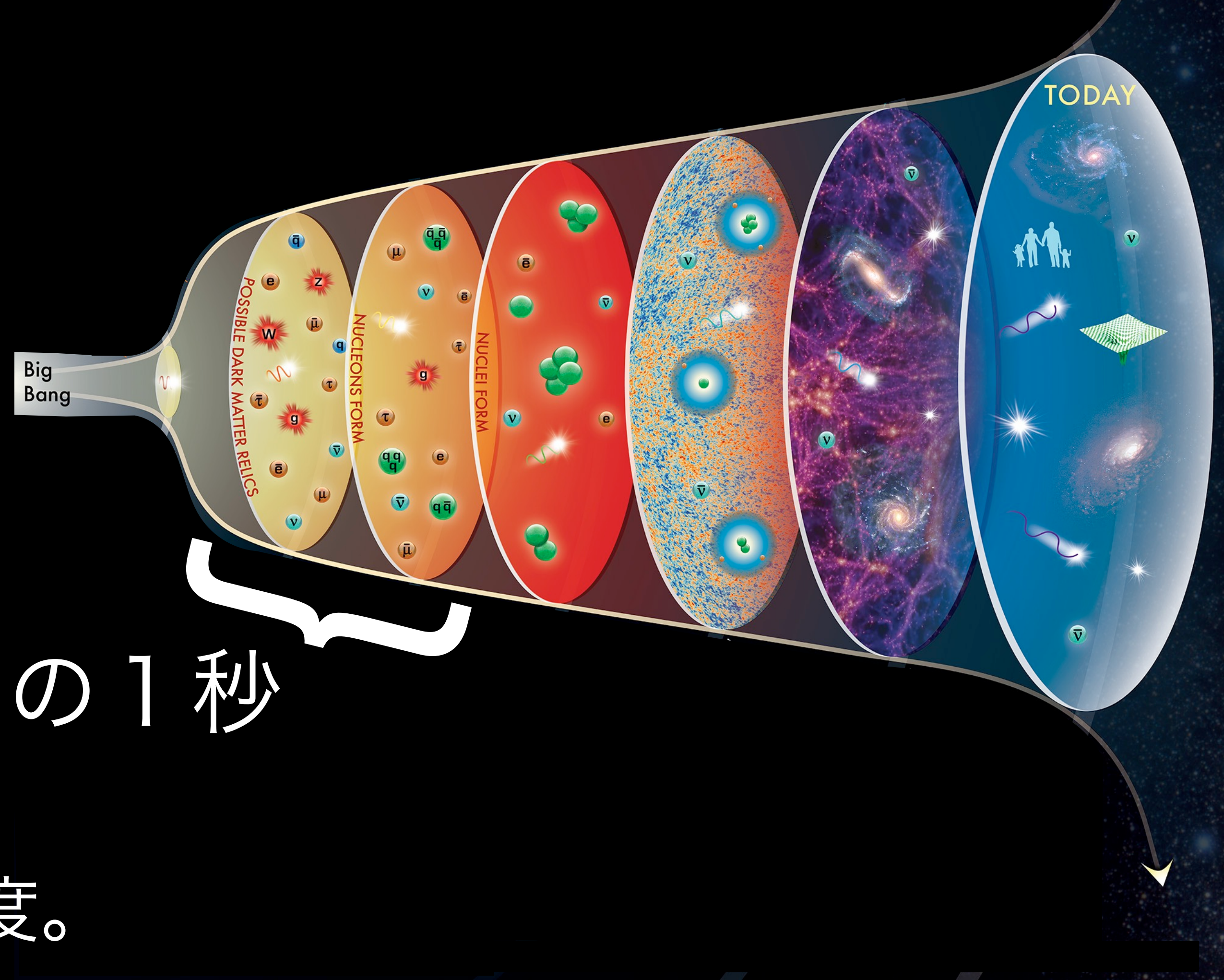
消えた
反物質の謎

暗黒物質
の正体は？

暗黒エネルギー
の正体は？

さらに・・・

宇宙の初期条件の問題

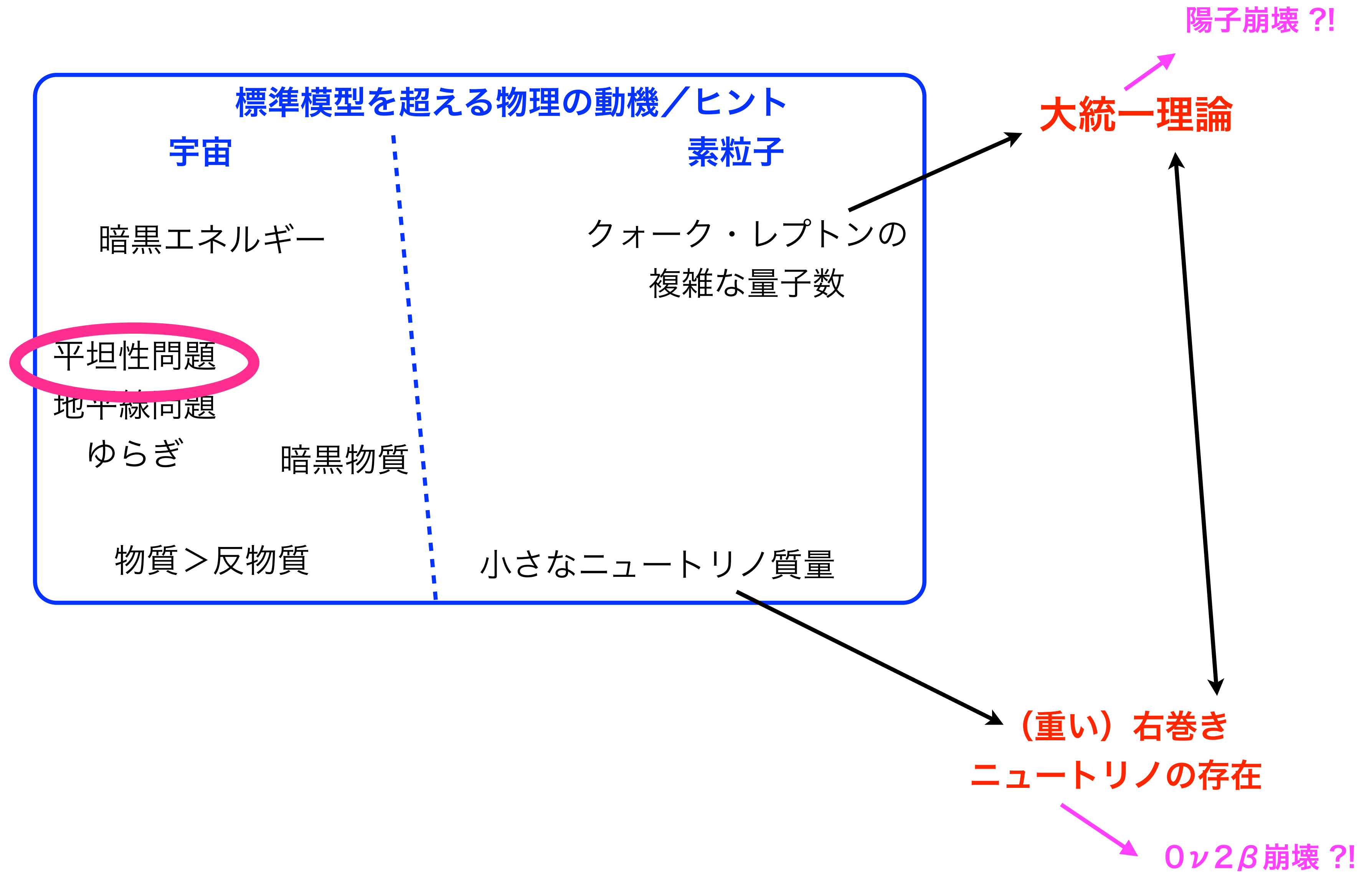


鍵は最初の1秒

超高温・超高密度。

全ての物質がバラバラの**素粒子**になって
激しくぶつかりあっている世界。

．．．．．理解するには**素粒子物理**が必要。



現在の宇宙はとっても平坦！

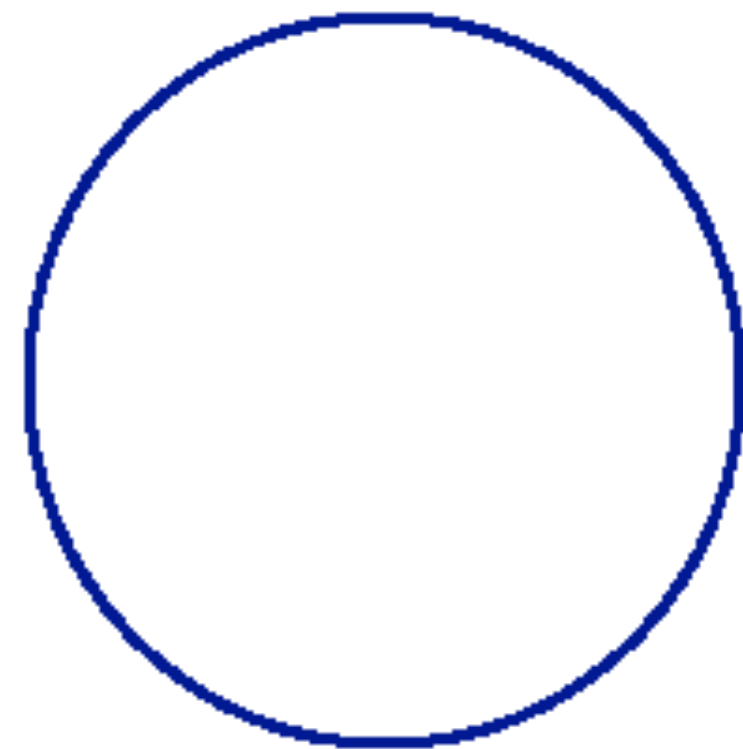
「宇宙の平坦さ」
を表す量：

$$\Omega = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho}{H^2}$$

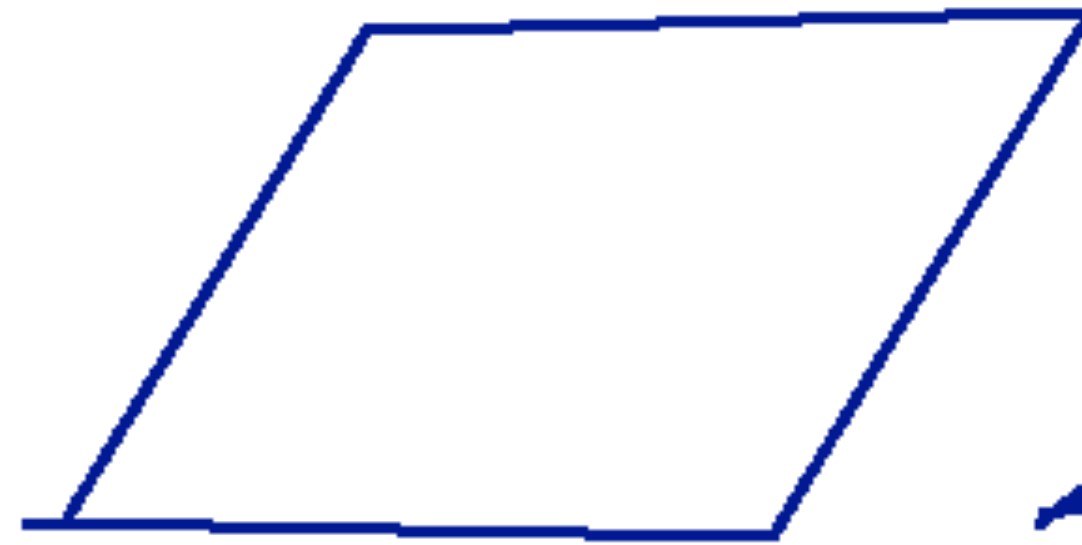
Newton定数

宇宙のエネルギー密度

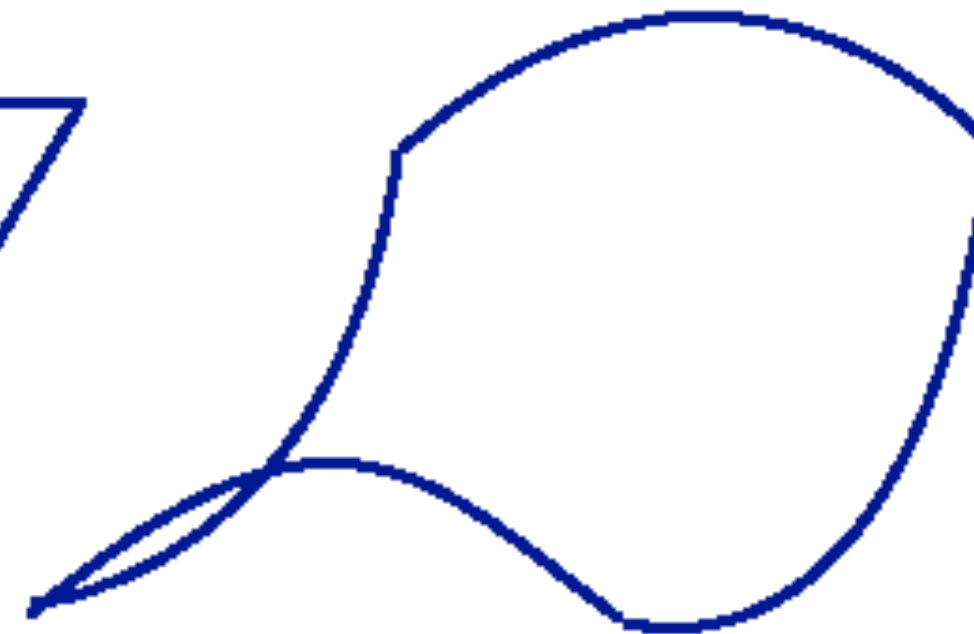
Hubbleパラメータ
(宇宙の膨張速度)



$\Omega > 1$
閉じた宇宙



$\Omega = 1$
平坦な宇宙



$\Omega < 1$
開いた宇宙

観測値： $\Omega = 0.999 \pm 0.002$ (とても平坦)

・・・実はコレがものすごく不思議！

Einstein 方程
式 によると：

$$\left| \frac{\Omega - 1}{\Omega} \right| \propto \frac{1}{\rho \cdot a^2}$$

宇宙の scale factor
(~宇宙の"大きさ")

宇宙のエネルギー密度

ところが標準宇宙論によると：
(Einstein 方程式 + 初期条件は火の玉宇宙)

$$\frac{1}{\rho \cdot a^2} \propto \begin{cases} t & (\text{for } t < 1 \text{ 万年}) \\ t^{2/3} & (\text{for } t > 1 \text{ 万年}) \end{cases}$$

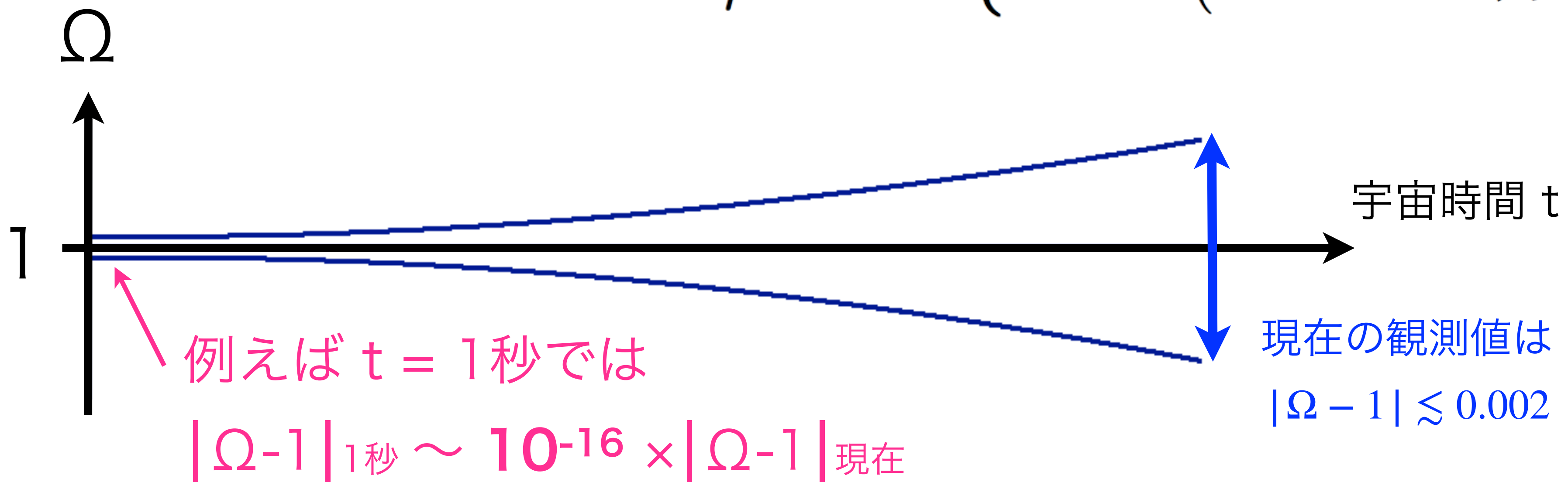
Einstein 方程
式 によると：

$$\left| \frac{\Omega - 1}{\Omega} \right| \propto \frac{1}{\rho \cdot a^2}$$

宇宙の scale factor
(~宇宙の"大きさ")

宇宙のエネルギー密度

ところが標準宇宙論によると：
(Einstein 方程式 + 初期条件は火の玉宇宙)

$$\frac{1}{\rho \cdot a^2} \propto \begin{cases} t & (\text{for } t < 1 \text{ 万年}) \\ t^{2/3} & (\text{for } t > 1 \text{ 万年}) \end{cases}$$


初期宇宙はものすご〜〜く平坦だった！

なんで？？ どうやって？ 初期条件の fine-tuning 問題

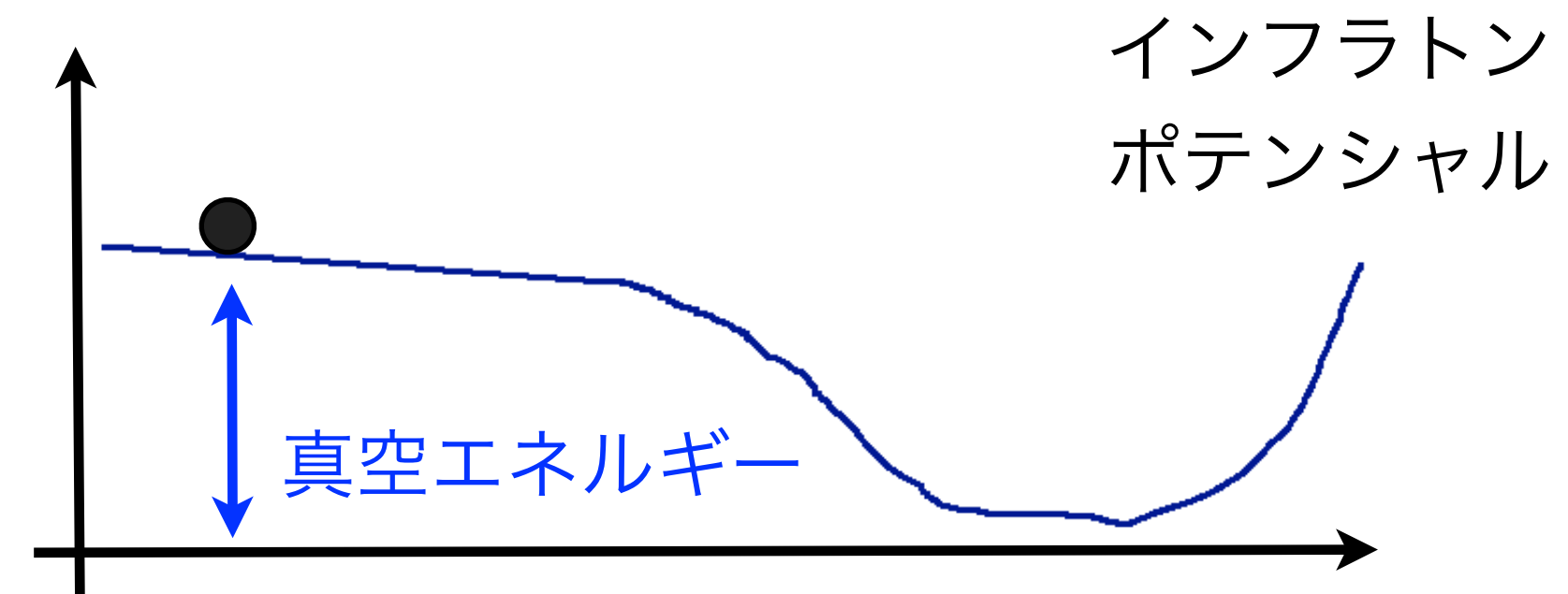
インフレーション：

宇宙の始まり：宇宙のエネルギーが真空のエネルギー
(=「インフラトン」のポテンシャルエネルギー)
に占められていた、と考える。

すると・・・

エネルギー密度 $\rho \sim \text{constant}$

scale factor $a \propto e^{H_i t}$ (指数関数的膨張 = インフレーション)

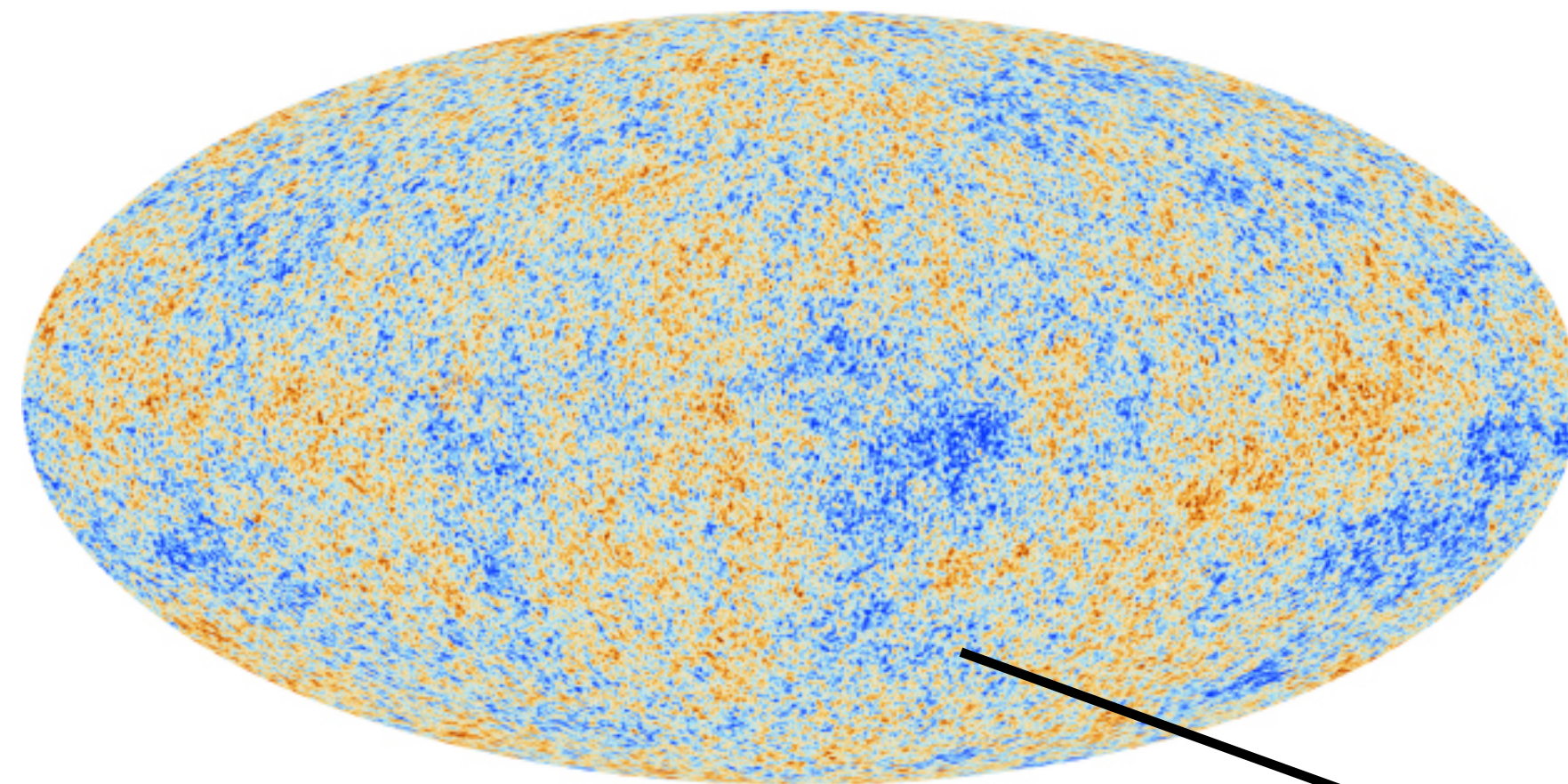


$$\left| \frac{\Omega - 1}{\Omega} \right| \propto \frac{1}{\rho \cdot a^2} \propto e^{-2H_i t}$$

自動的に $\Omega = 1$ (平坦な宇宙) に tune してくれる！

しかも・・・

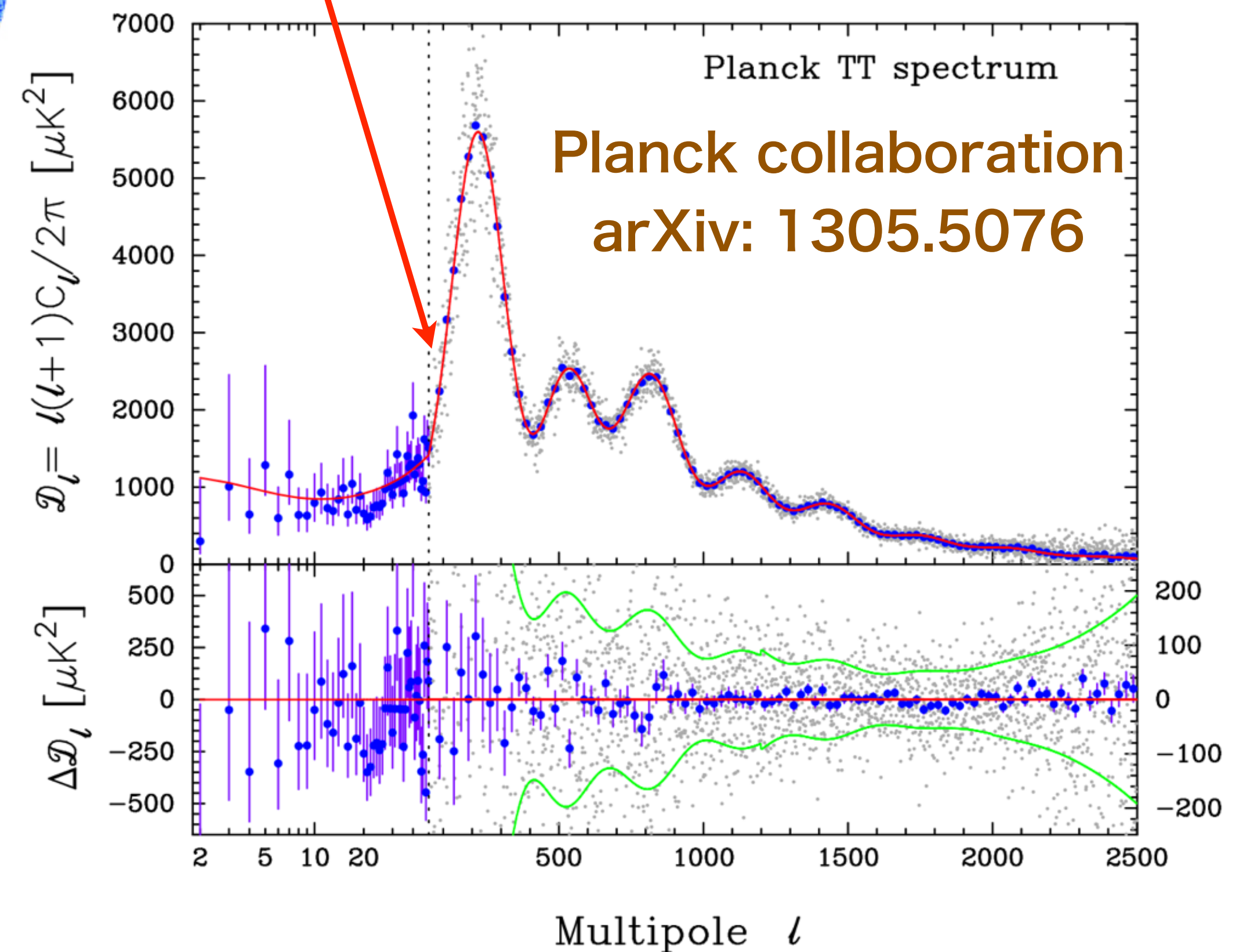
温度ゆらぎ

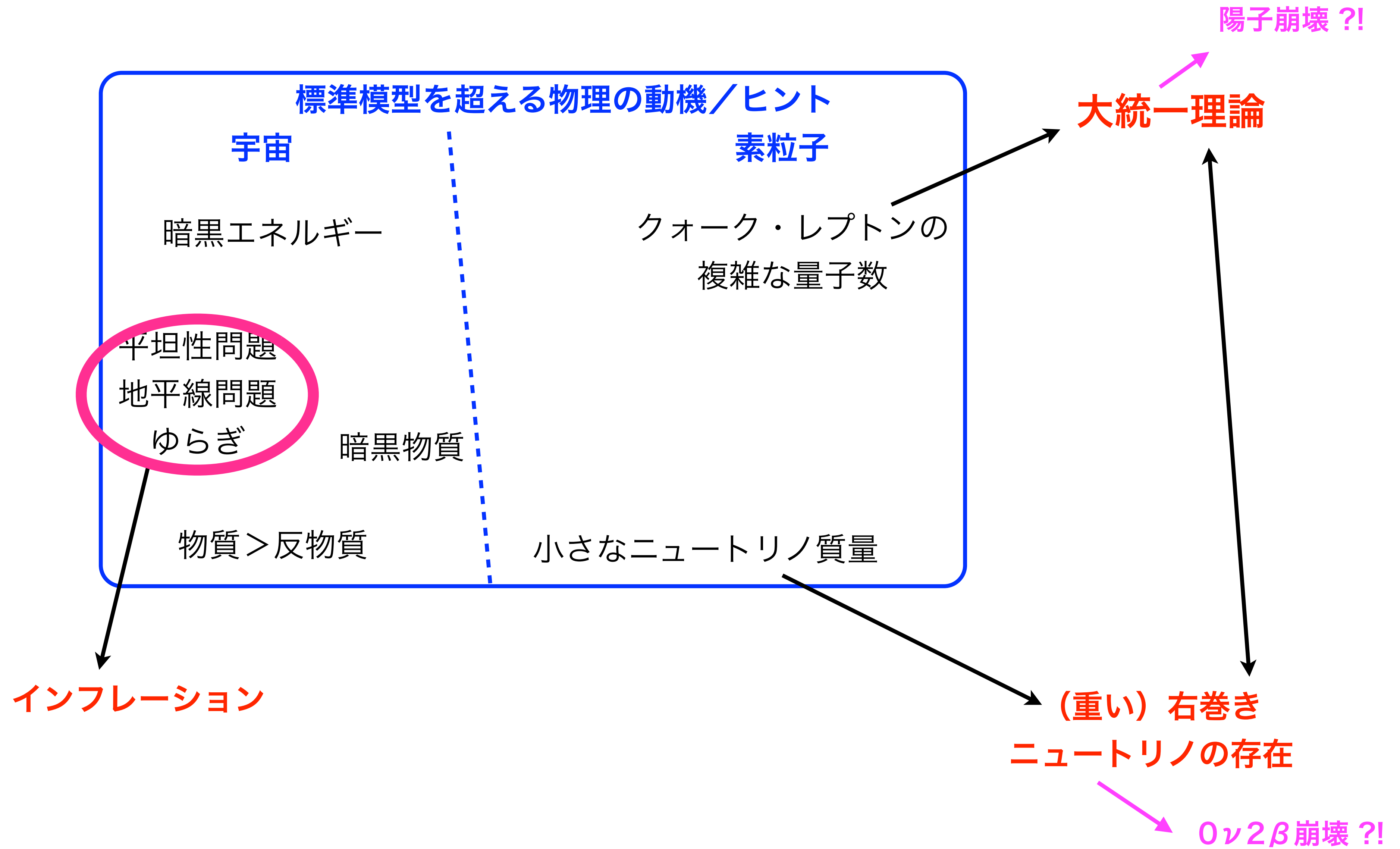


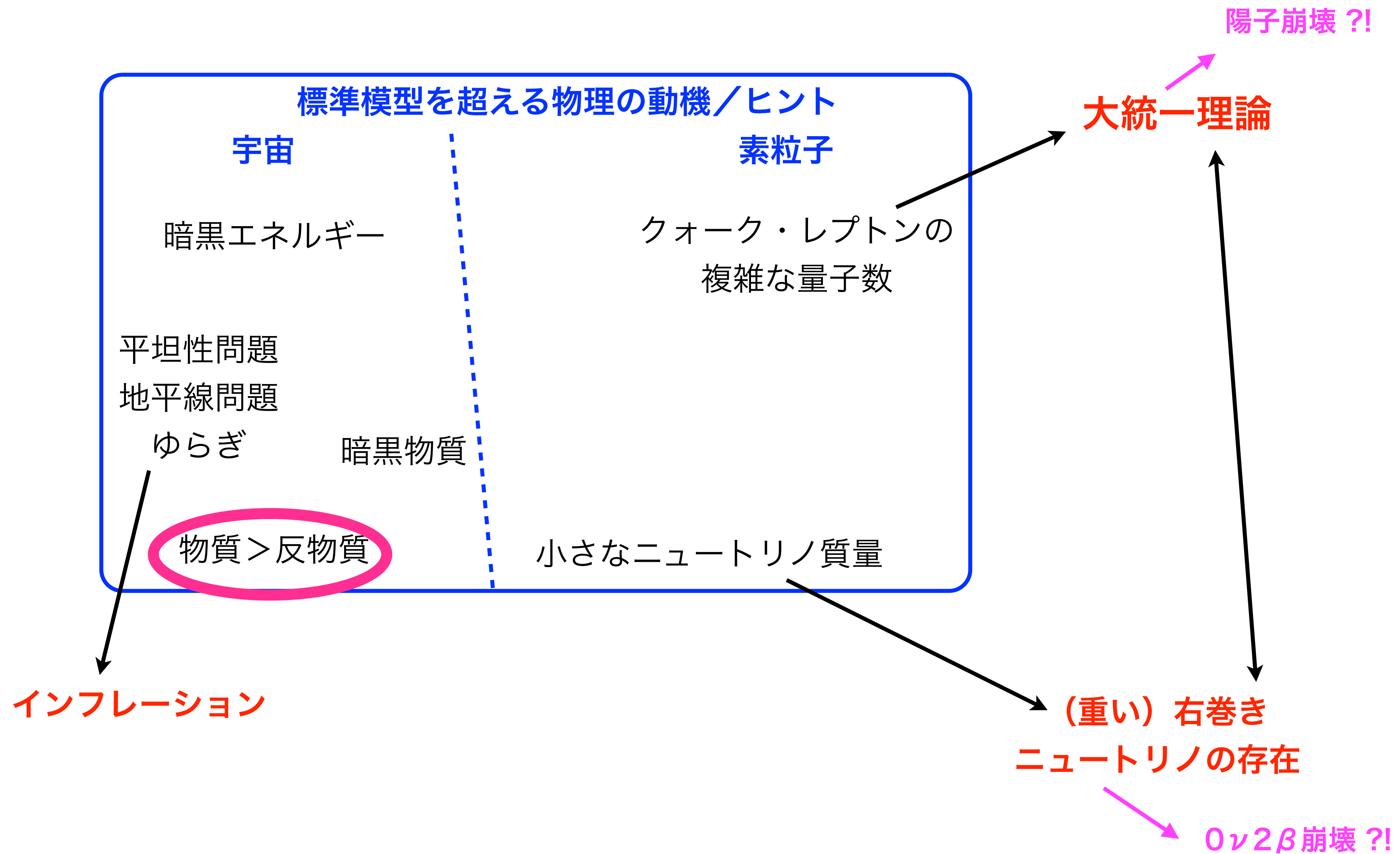
球面調和関数で展開

<http://sci.esa.int/planck/>

インフレーションの予言する
“scale invariant” な初期ゆらぎで
非常によくフィット出来ている！
(パラメータ数個)

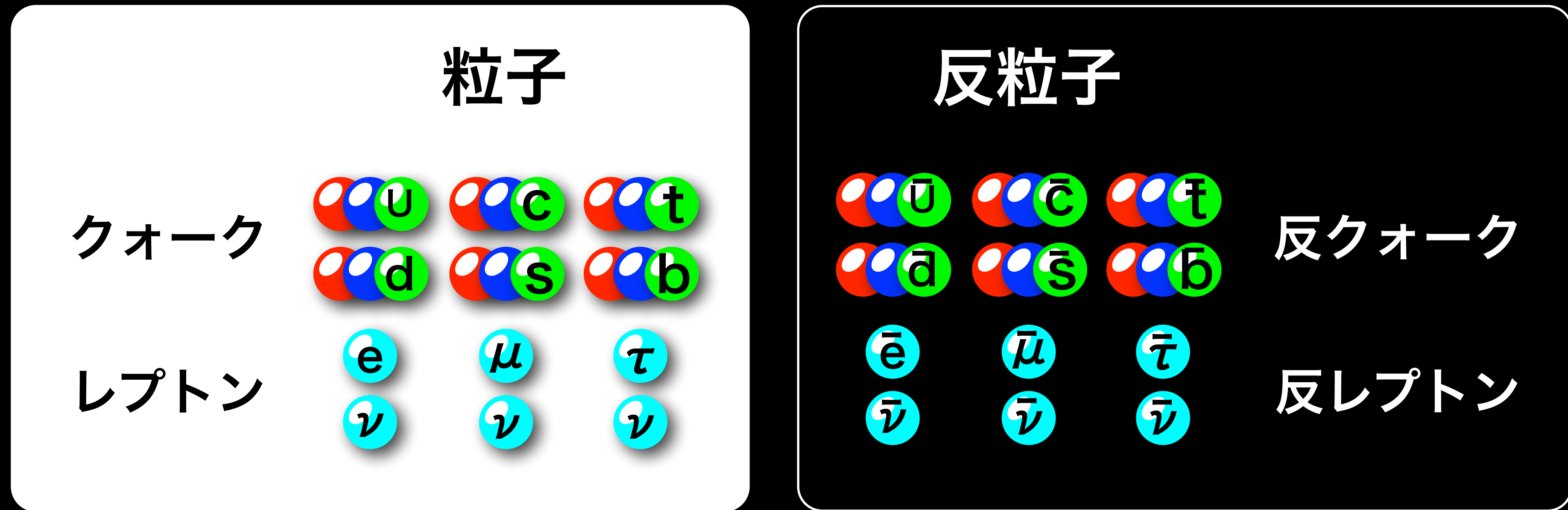




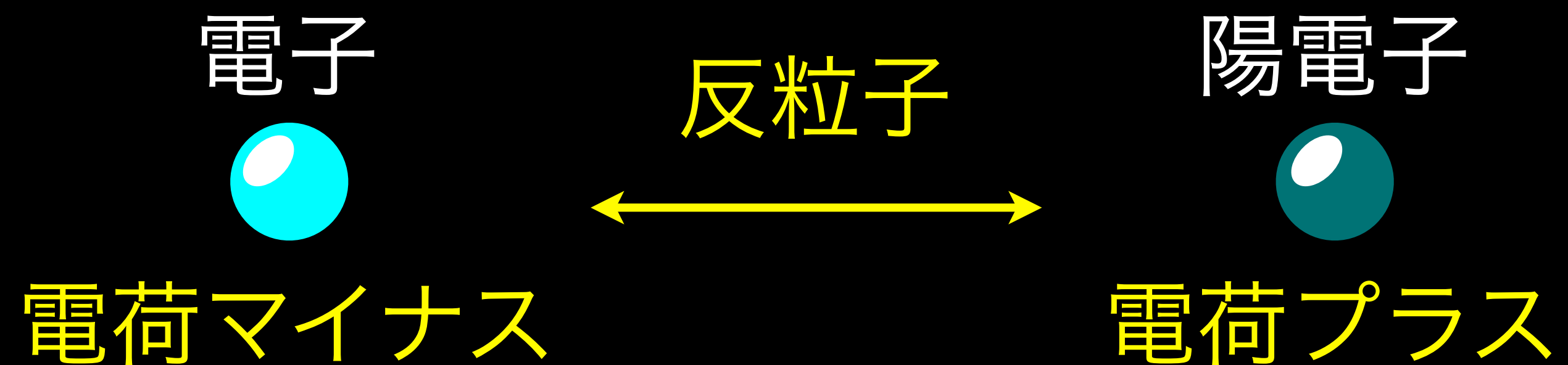


次は・・・

全ての素粒子には **反粒子**が存在する。

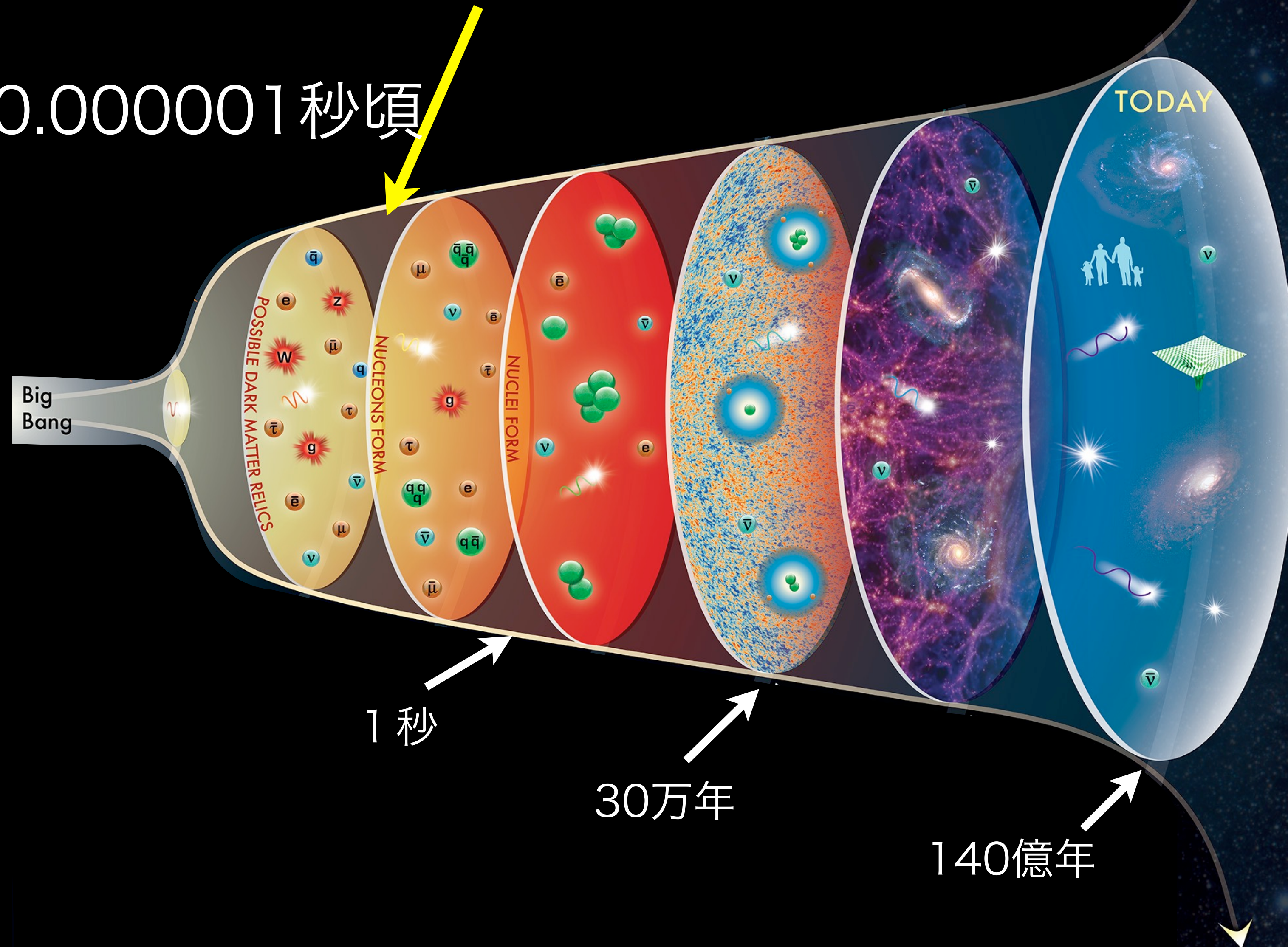


粒子と反粒子は、重さが全く同じで反対の電荷を持つ。



宇宙のずっと始めの頃は . . .

0.000001 秒頃

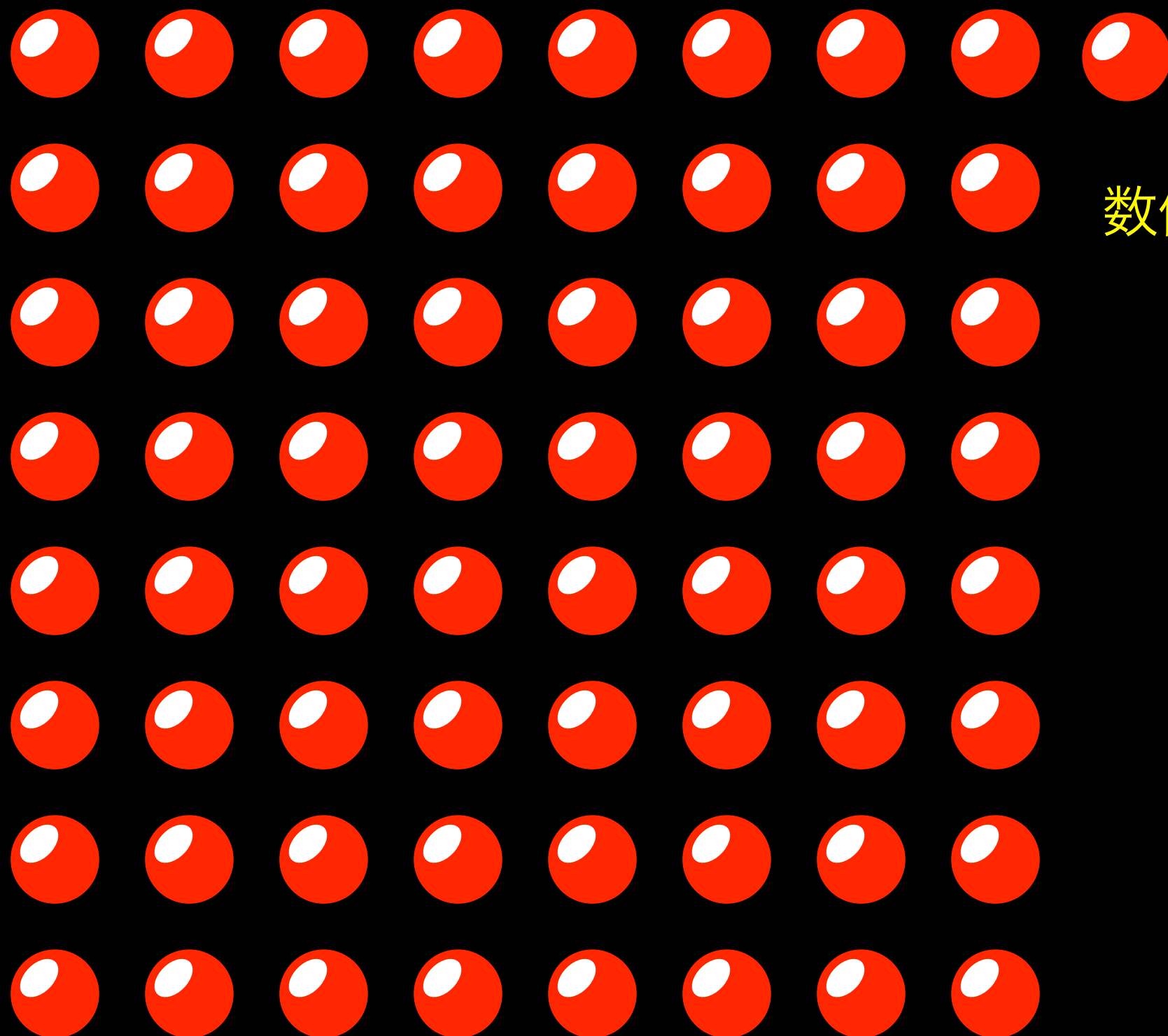


宇宙のずっと始めの頃は・・・

物質と反物質がほぼ同数あった。

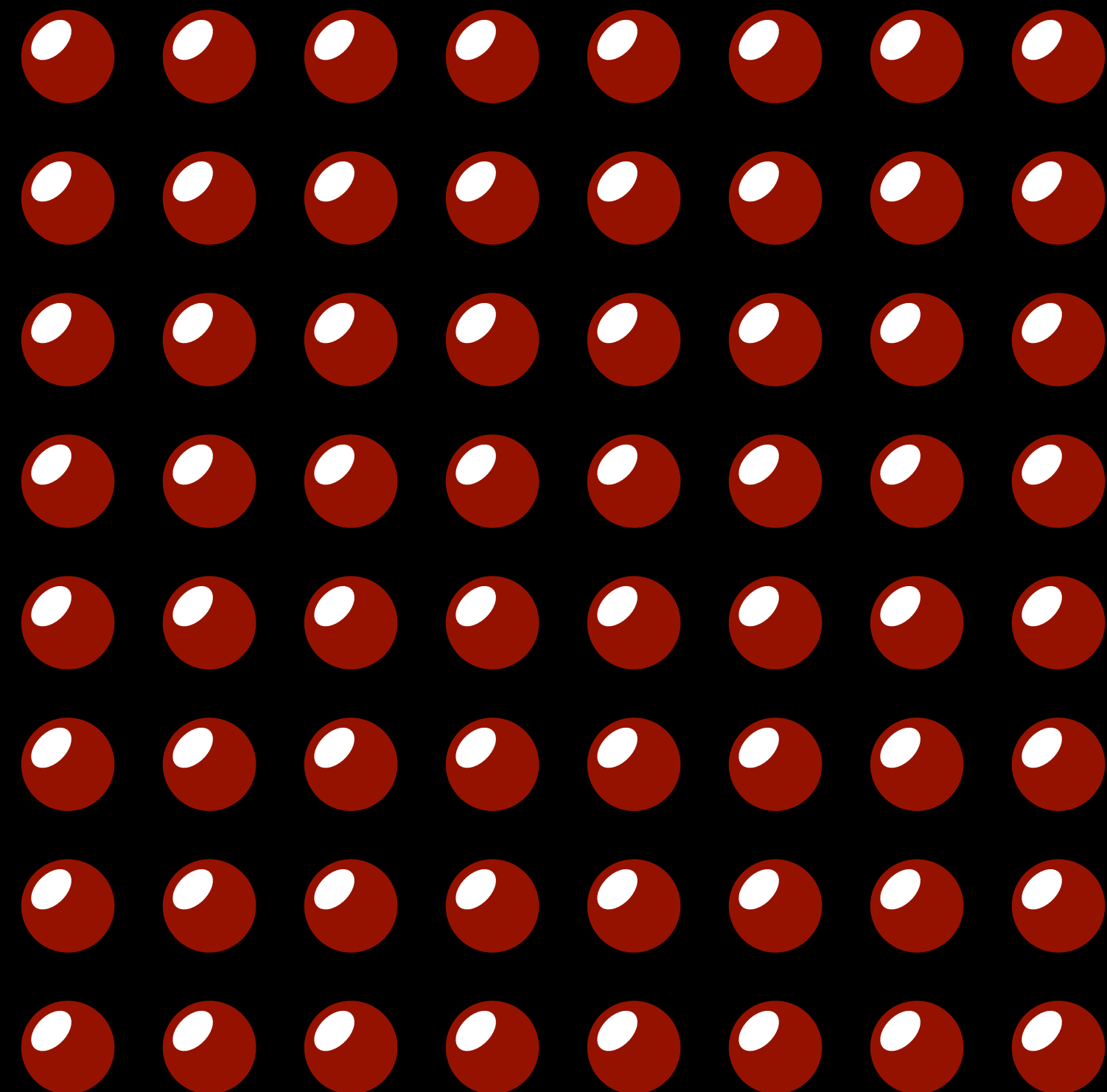
ただし物質の方がほんの少しだけ多かった。

物質



数億分の1の
差

反物質



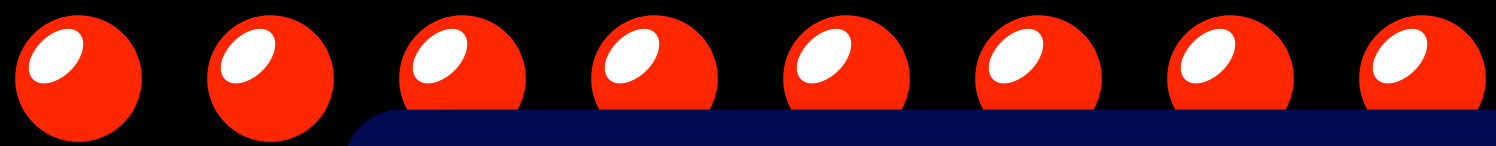
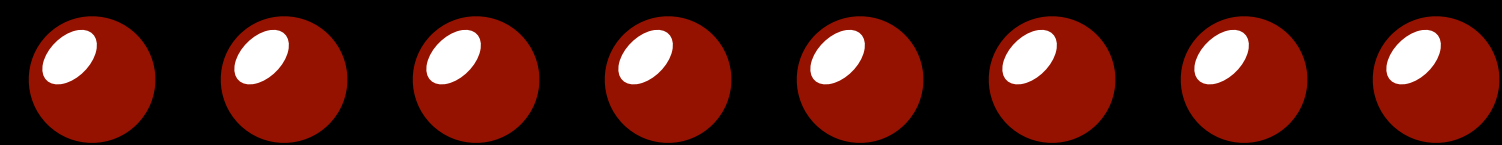
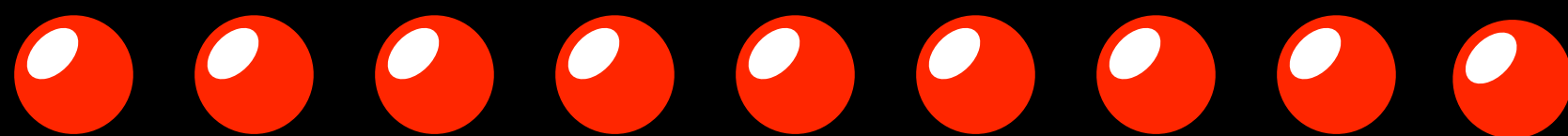
宇宙のずっと始めの頃は・・・

物質と反物質がほぼ同数あった。

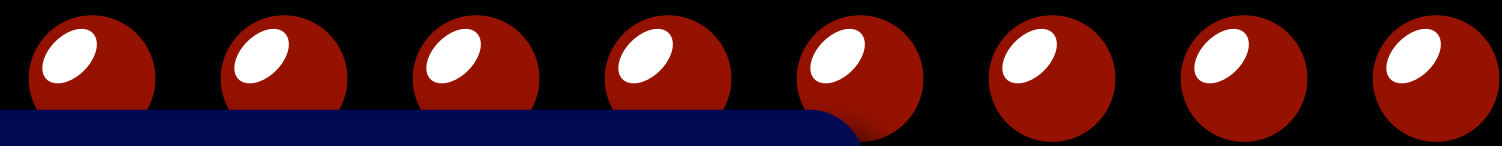
やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質

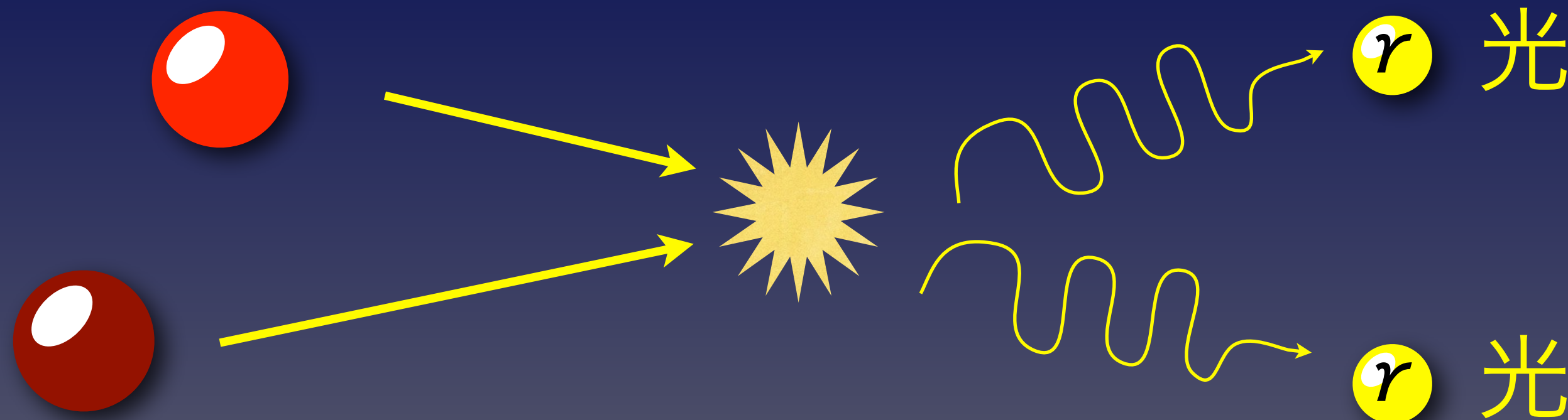
反物質



粒子の1の倍



粒子と反粒子の**対消滅**



宇宙のずっと始めの頃は・・・

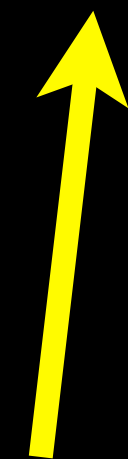
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質だけが残った



(反物質は消滅)



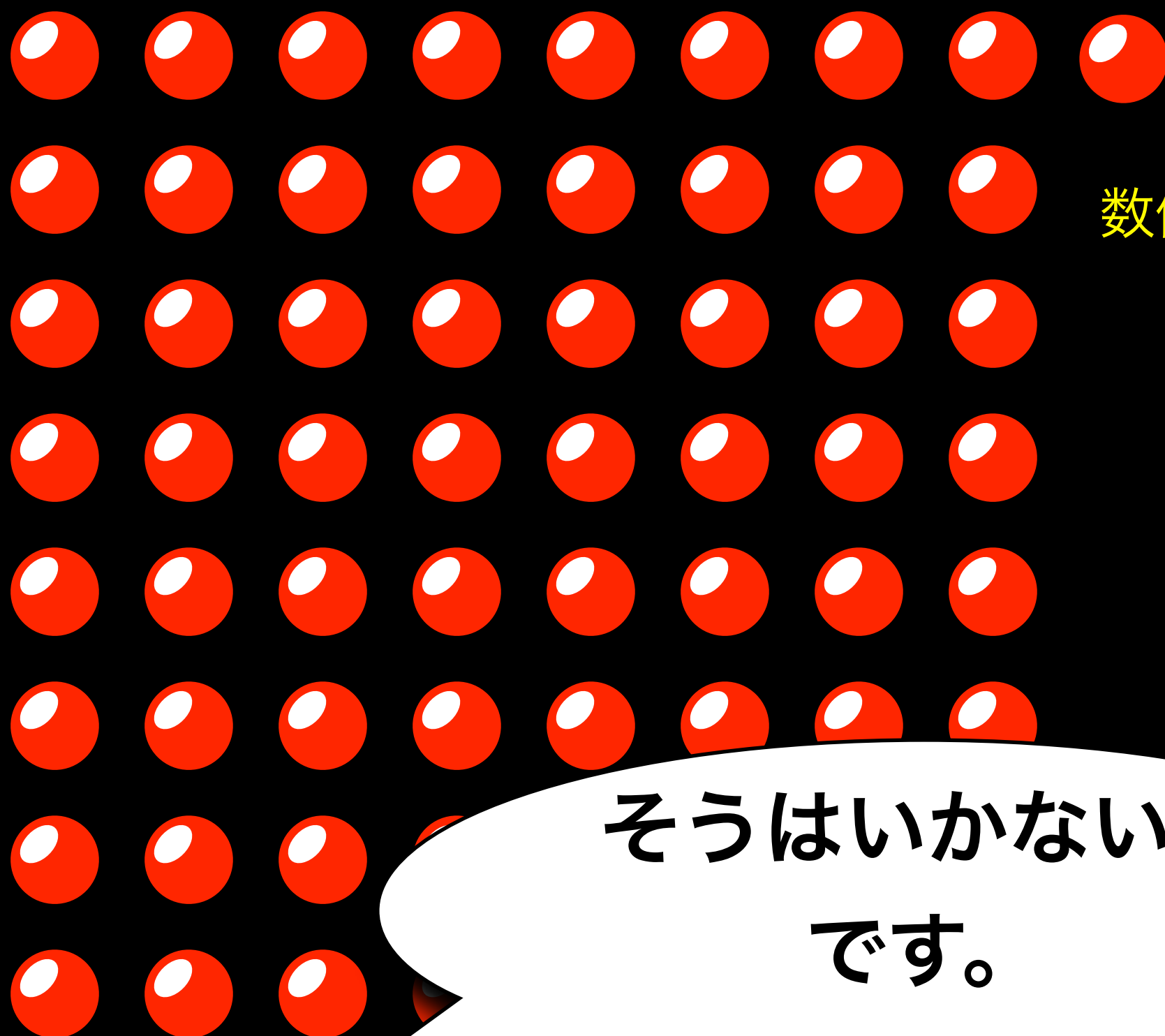
我々は（銀河も地球も人間の体も・・・）

この残った物質で出来ている！

謎

最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？

物質



数億分の1の
差

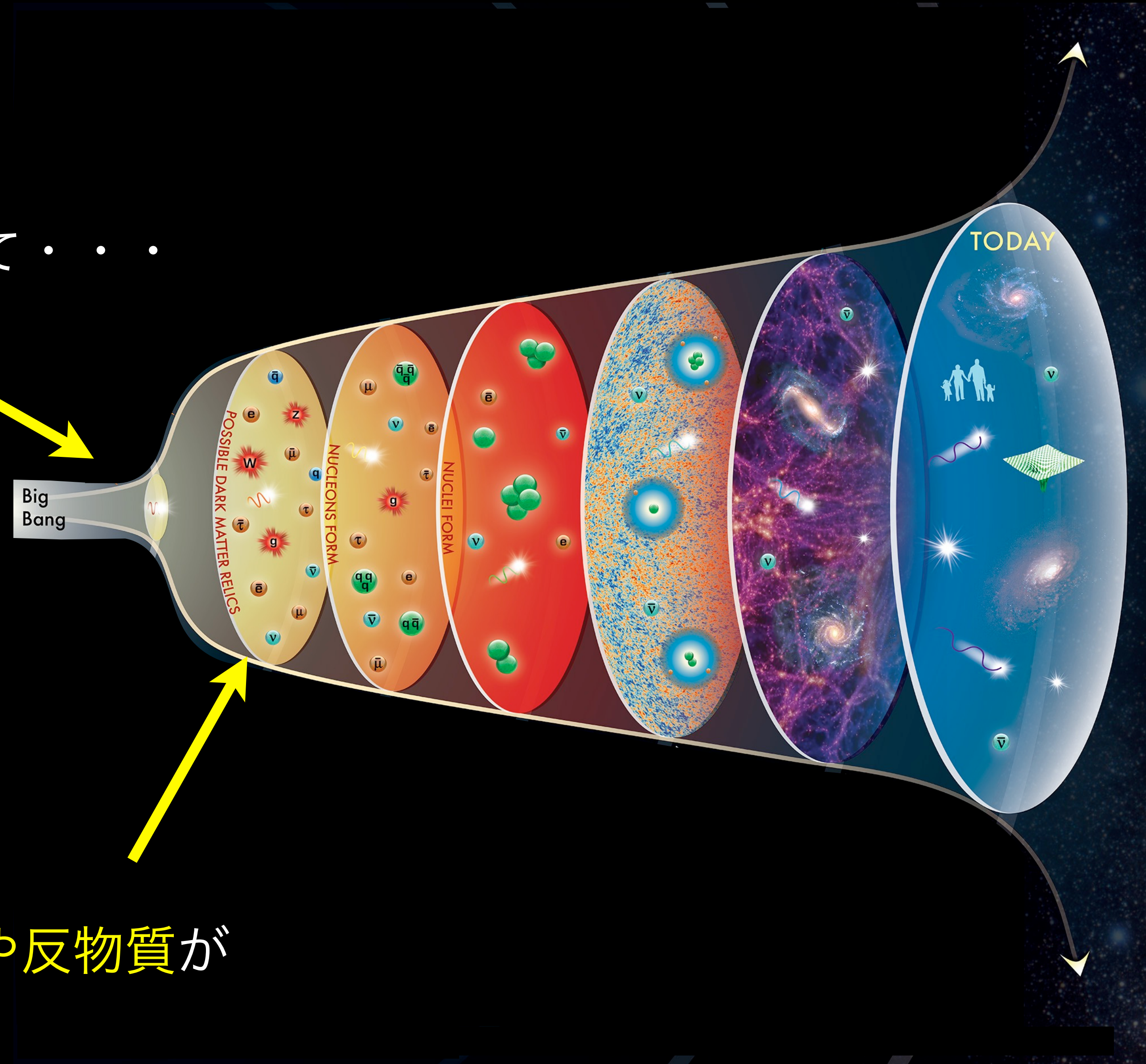
反物質



そうはいかないん
です。

最初っから
あったんじゃない？

インフレーションによると、
最初は物質も反物質もなく、
真空のエネルギーだけがあって・・・

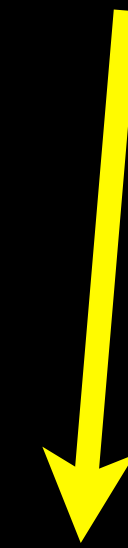
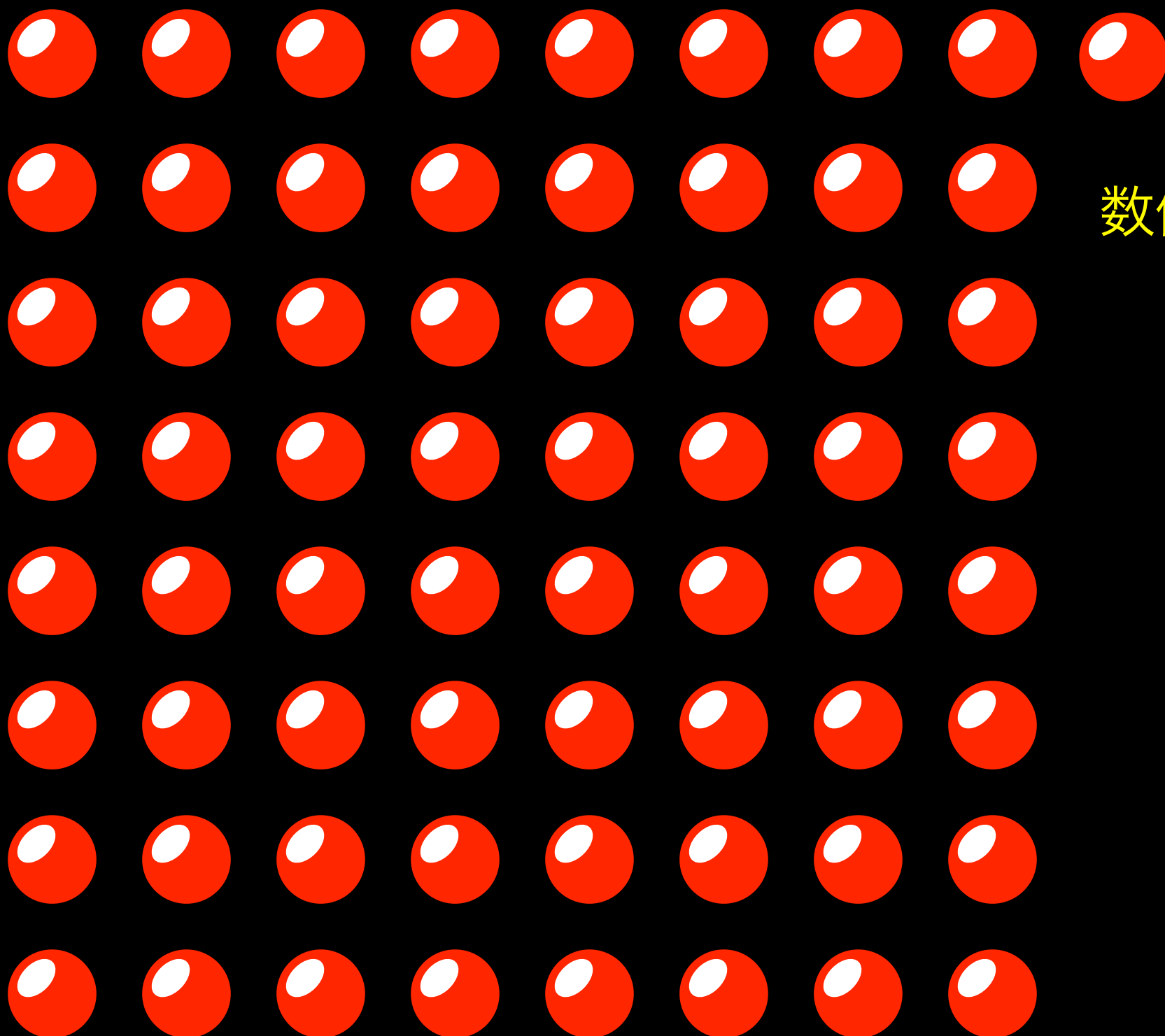


そこから物質や反物質が
作られた。

謎

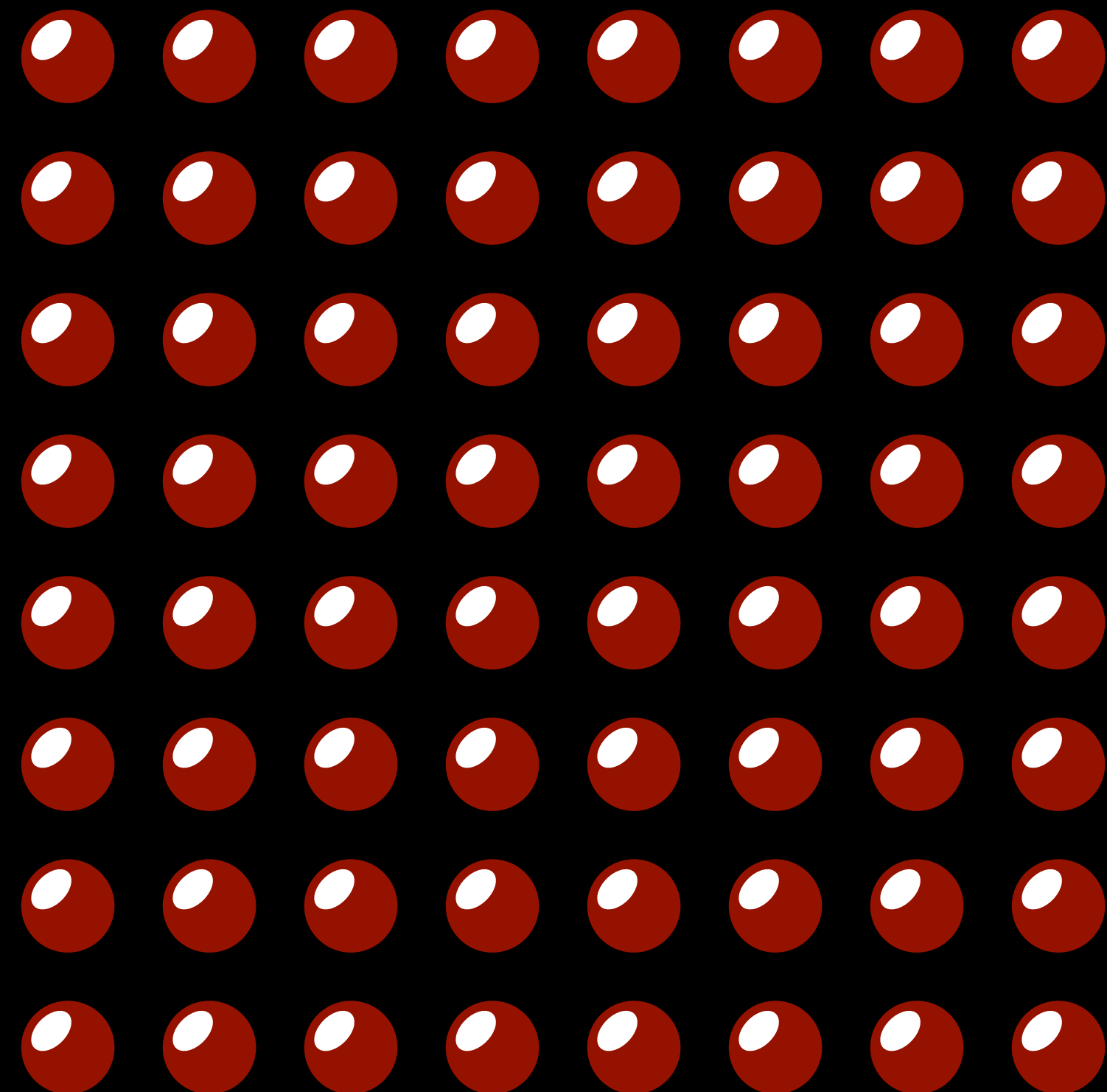
最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？

物質



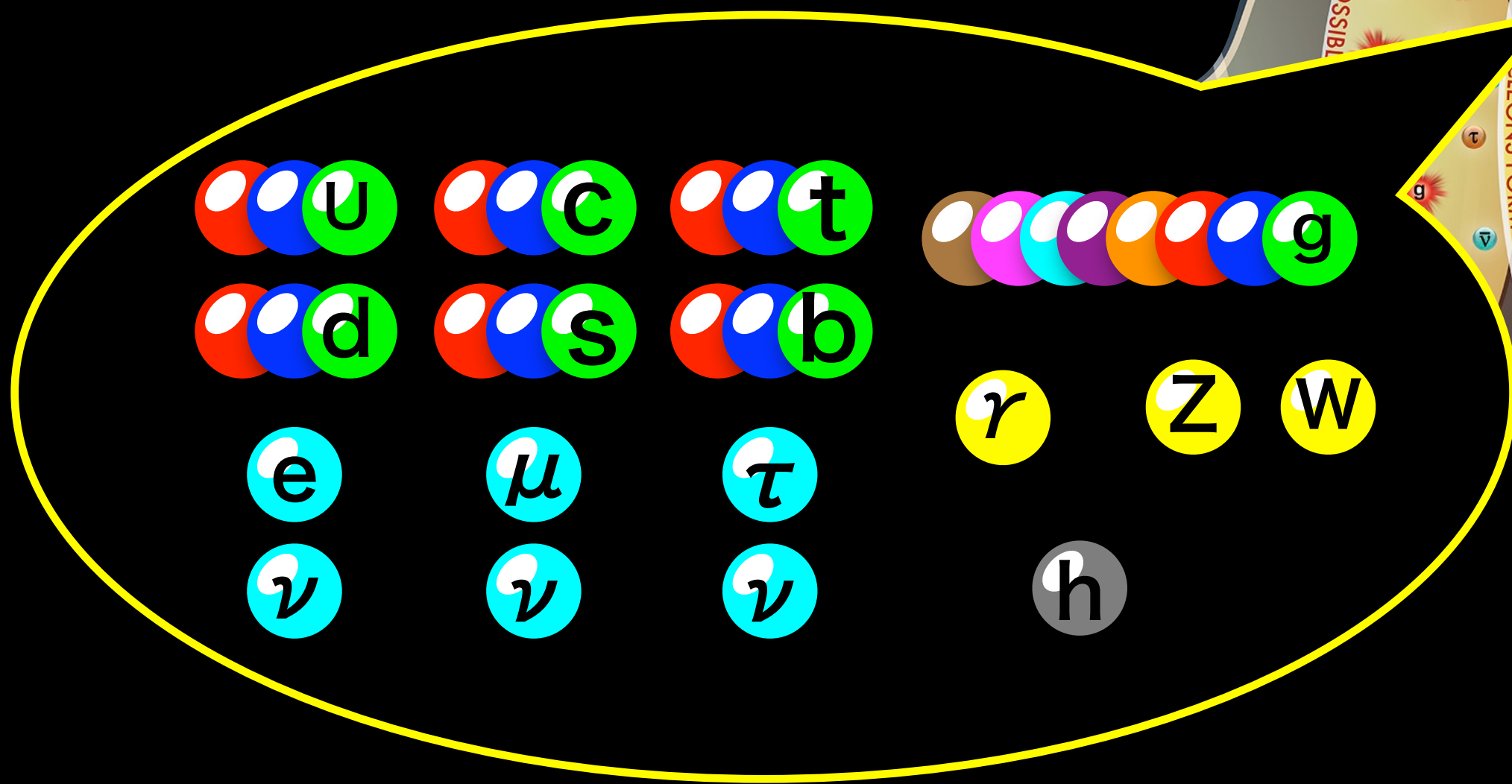
数億分の1の
差

反物質



謎

最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？



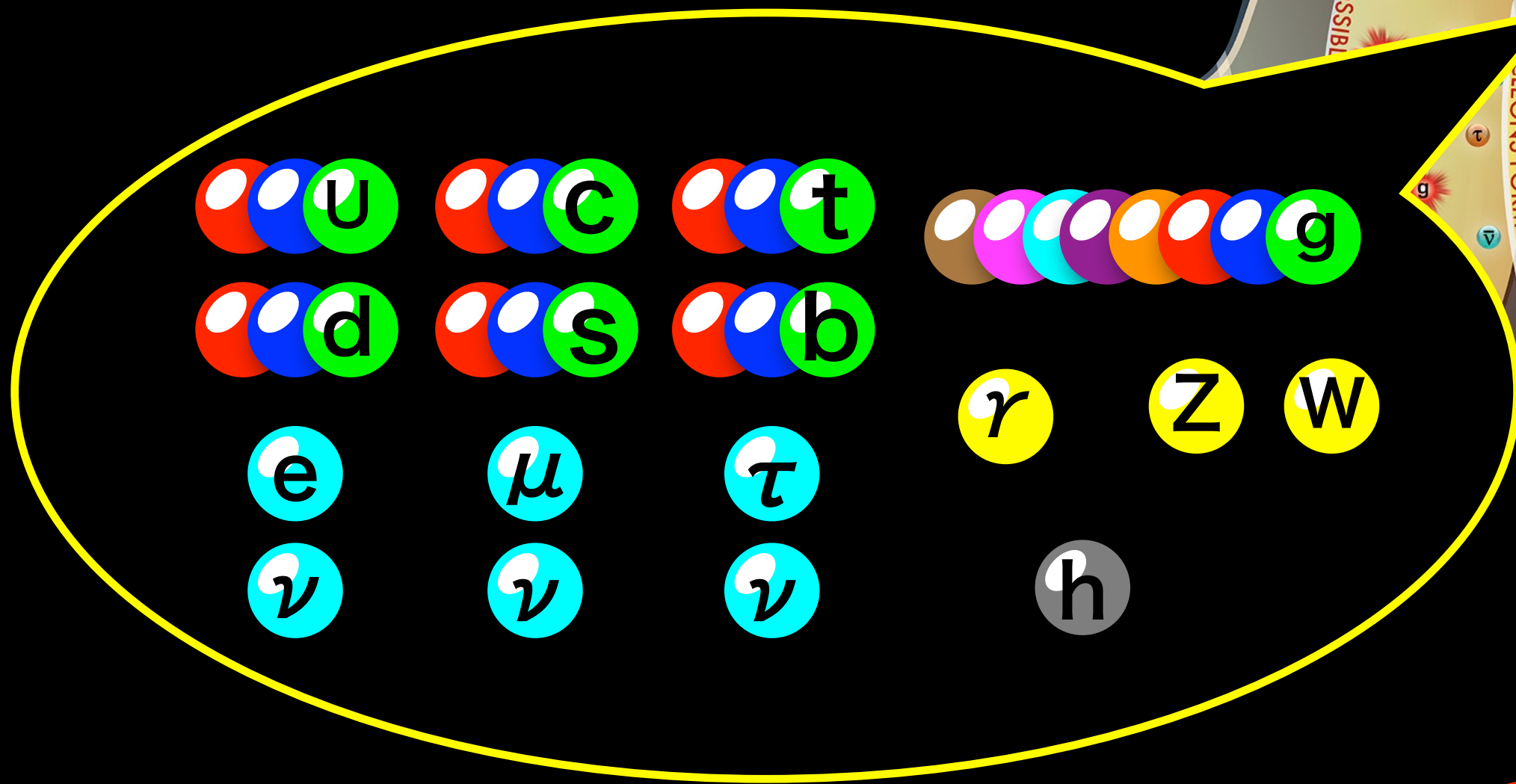
実は、**標準模型**では **物質＞反物質の起源は説明出来ない**
ことが知られている。

理由1：標準模型のC Pの破れでは**足りない**。

理由2：物質＞反物質に必要な**非平衡が出来ない**。

謎

最初にあったこのわずかな差は
どうやって作られたのか？

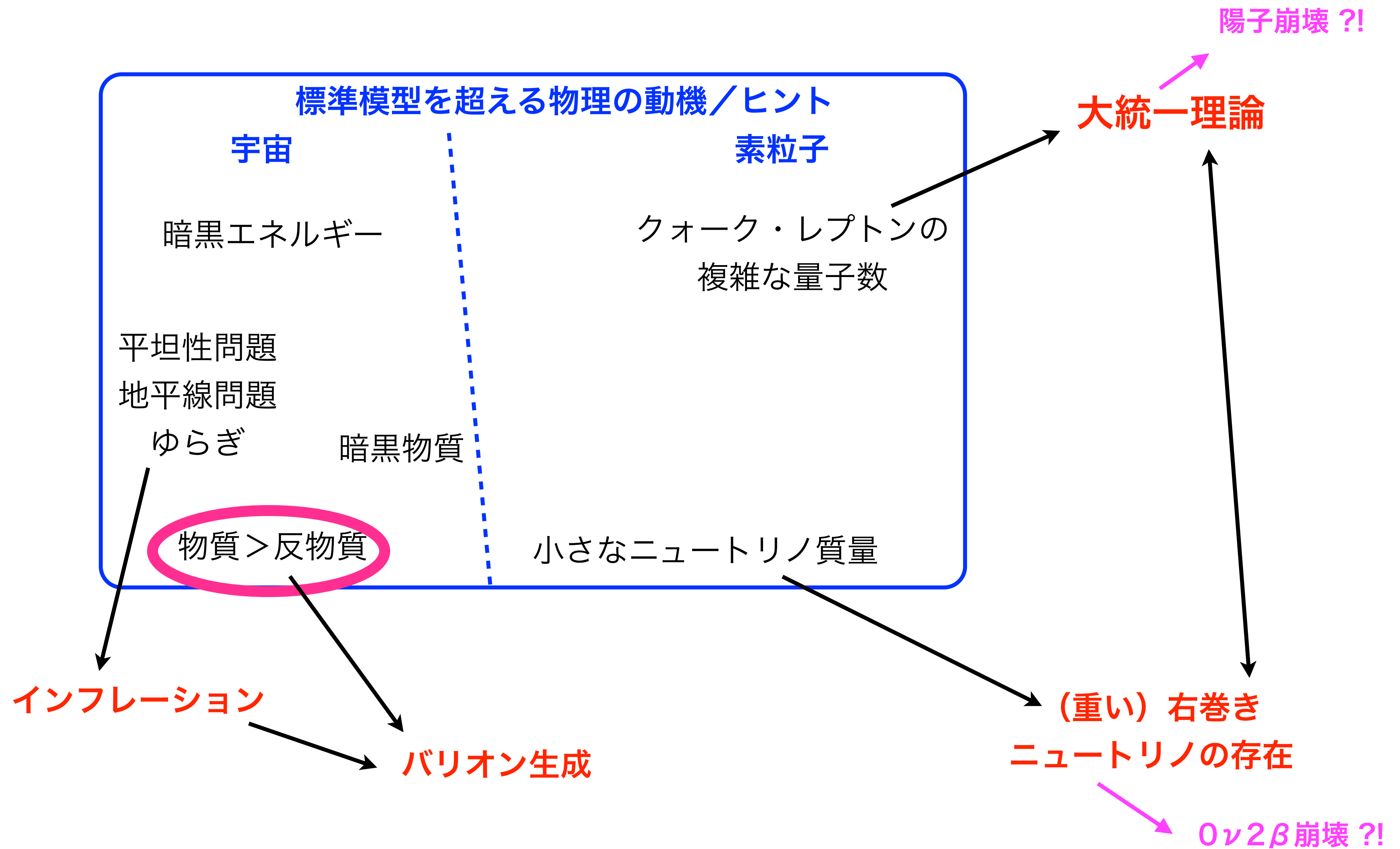


実は、標準模型では物質と反物質の
ことが知られている。

標準模型を超える素粒子理論が必要！

理由1：標準模型のC Pの破れでは足りない。

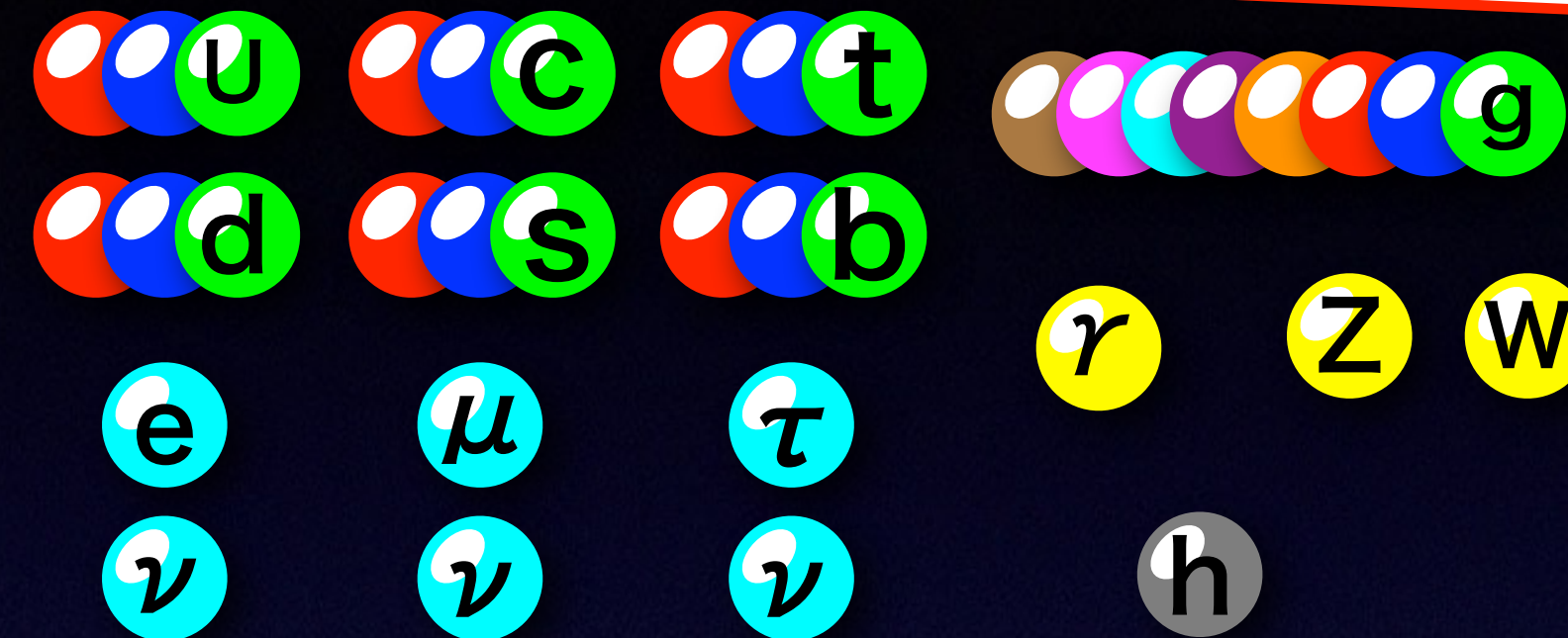
理由2：物質＞反物質に必要な非平衡が出来ない。



物質＞反物質の起源

標準模型を超える素粒子理論が必要！

標準模型



+



右巻きニュートリノ

- 有力候補の1つ：右巻きニュートリノ（←また！）

物質＞反物質の起源

標準模型を超える素粒子理論が必要！

標準模型

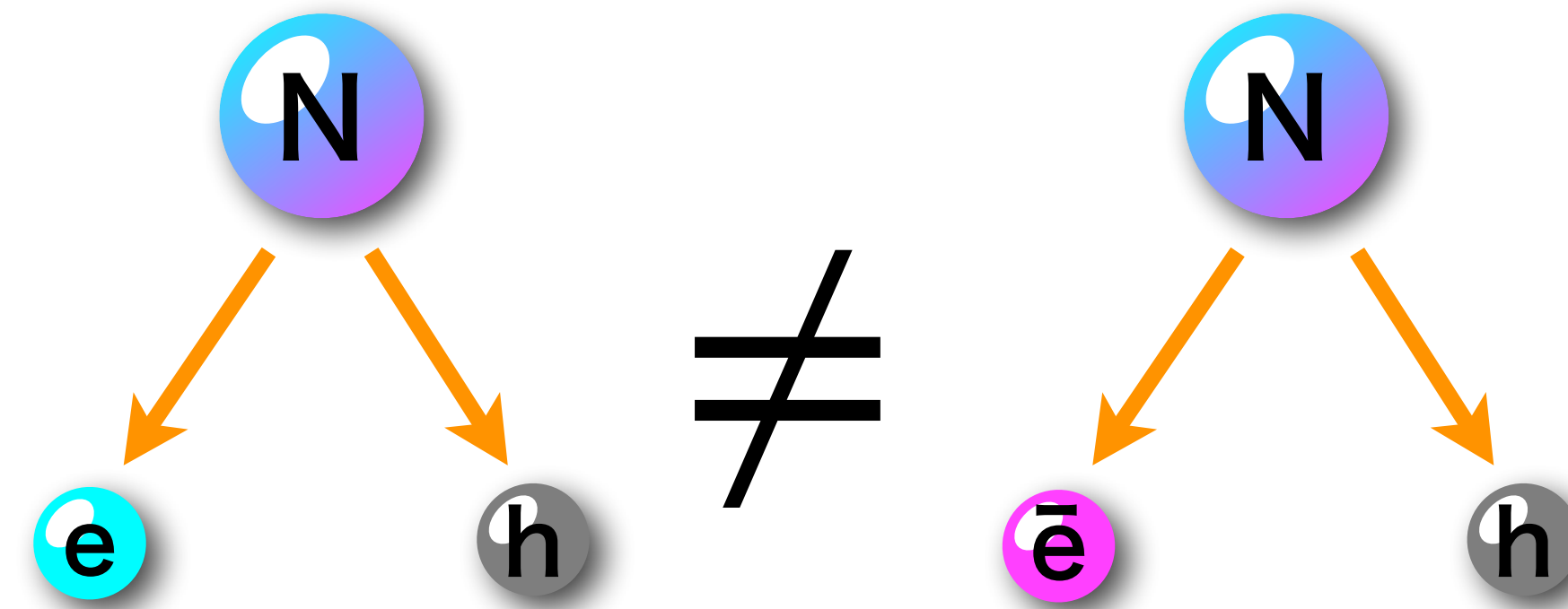


+

N_1
右巻

- 有力候補の1つ：右巻

レプトジェネシス



今も盛んに研究されている。

(私もたくさん論文書きました・・・。)

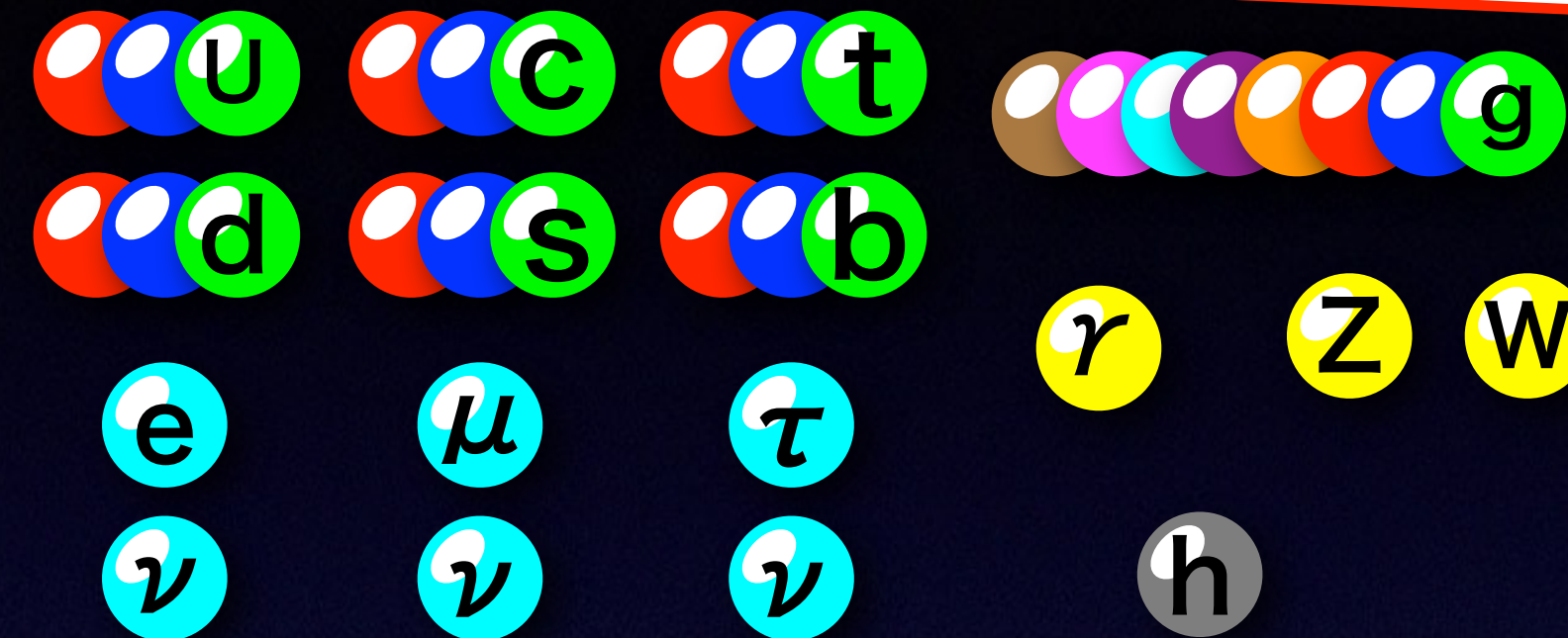
N_1 の崩壊 (CPを破っている) で

物質＞反物質を説明 [レプトジェネシス] 福来・柳田 1986

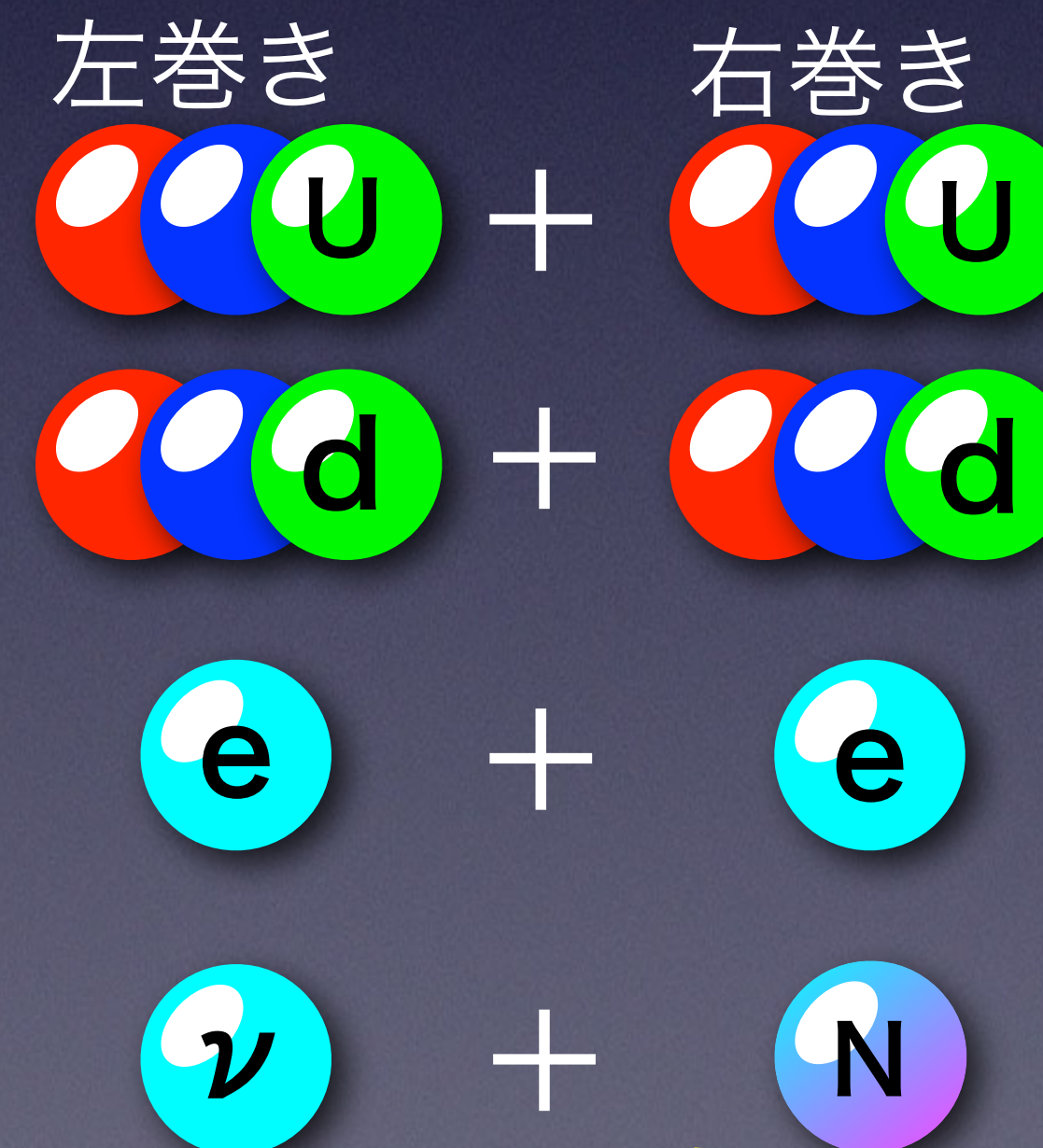
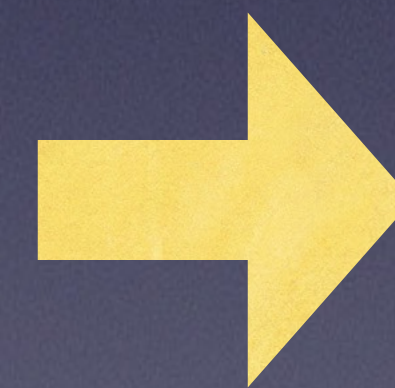
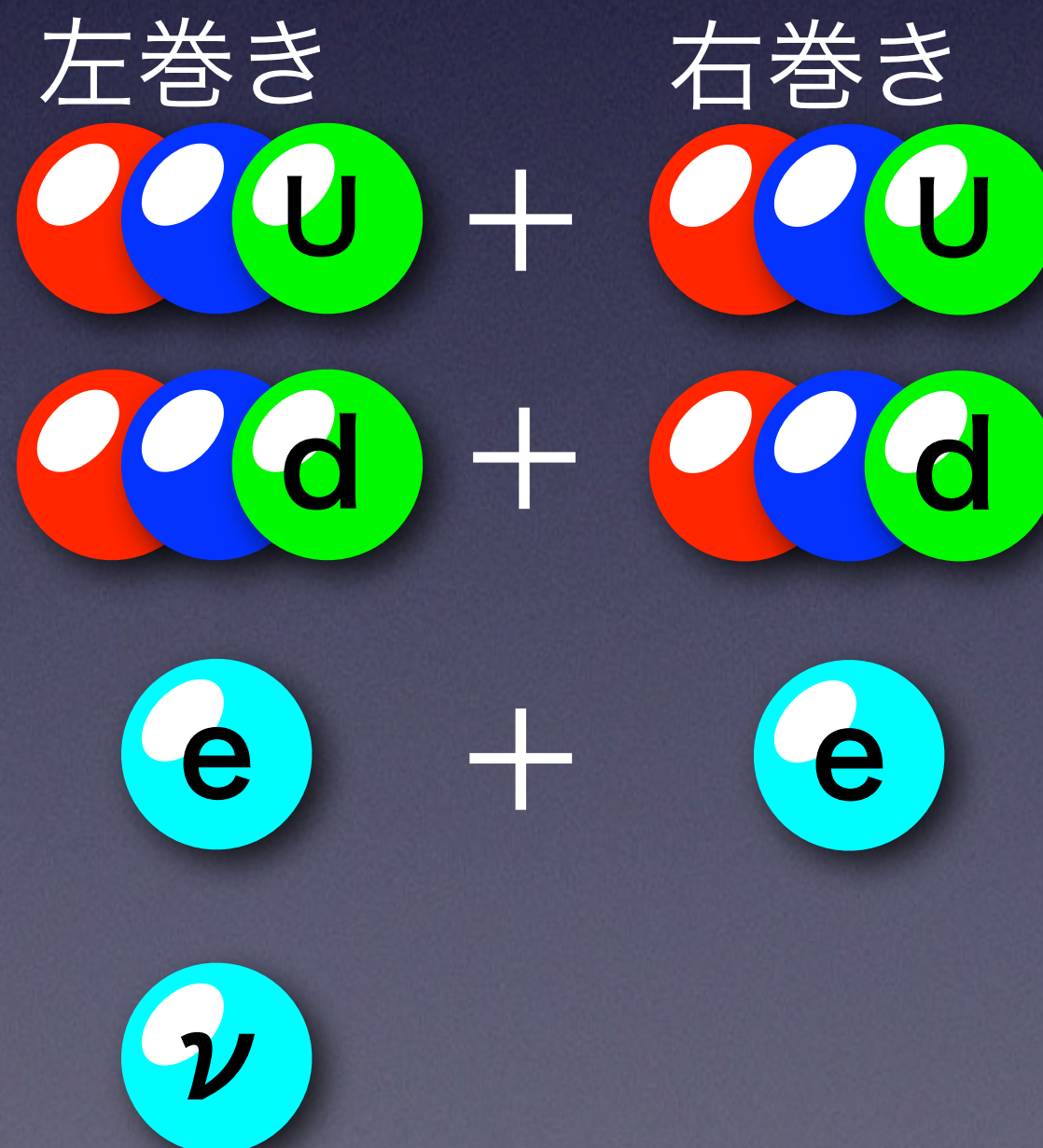
物質＞反物質の起源

標準模型を超える素粒子理論が必要！

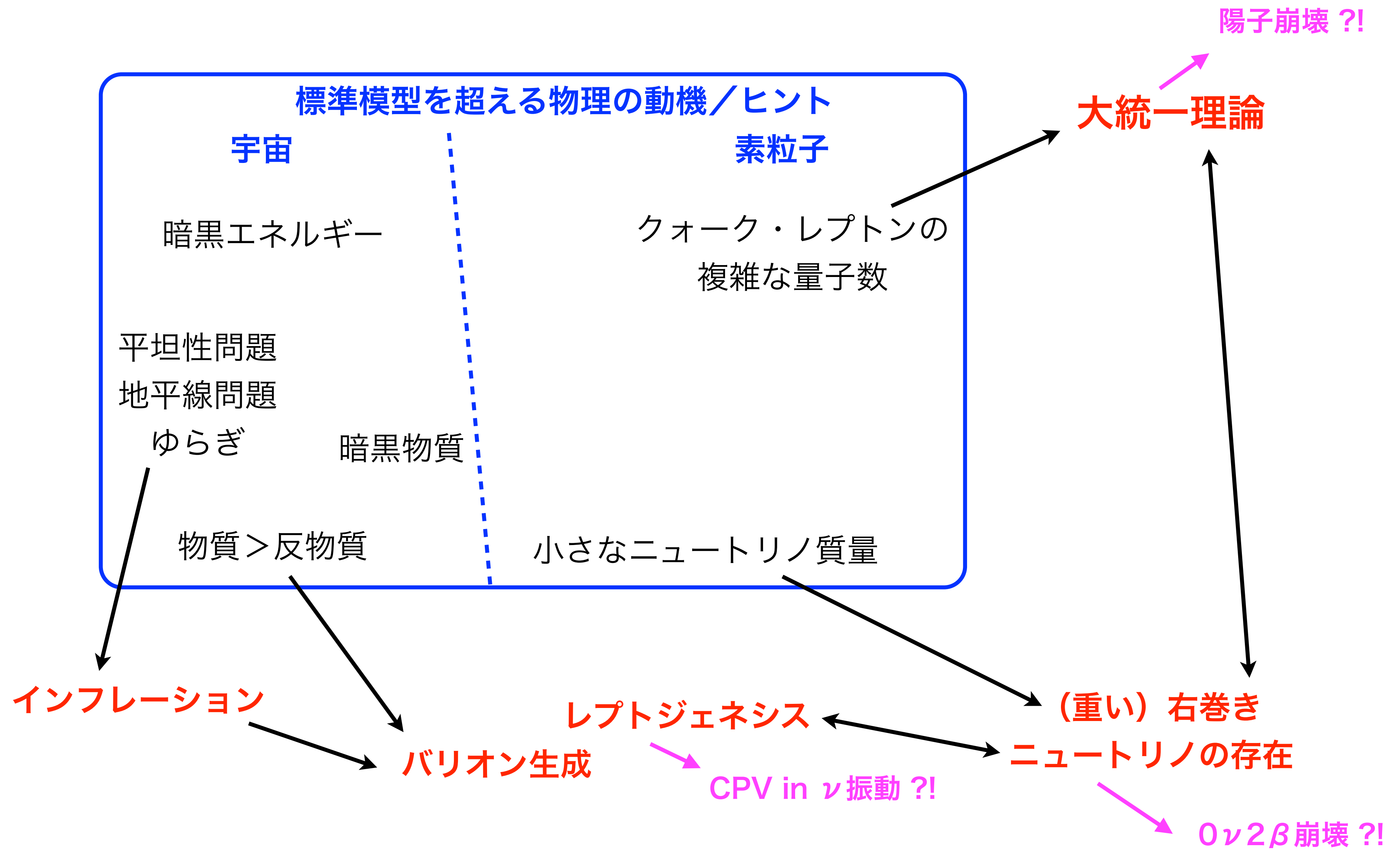
標準模型

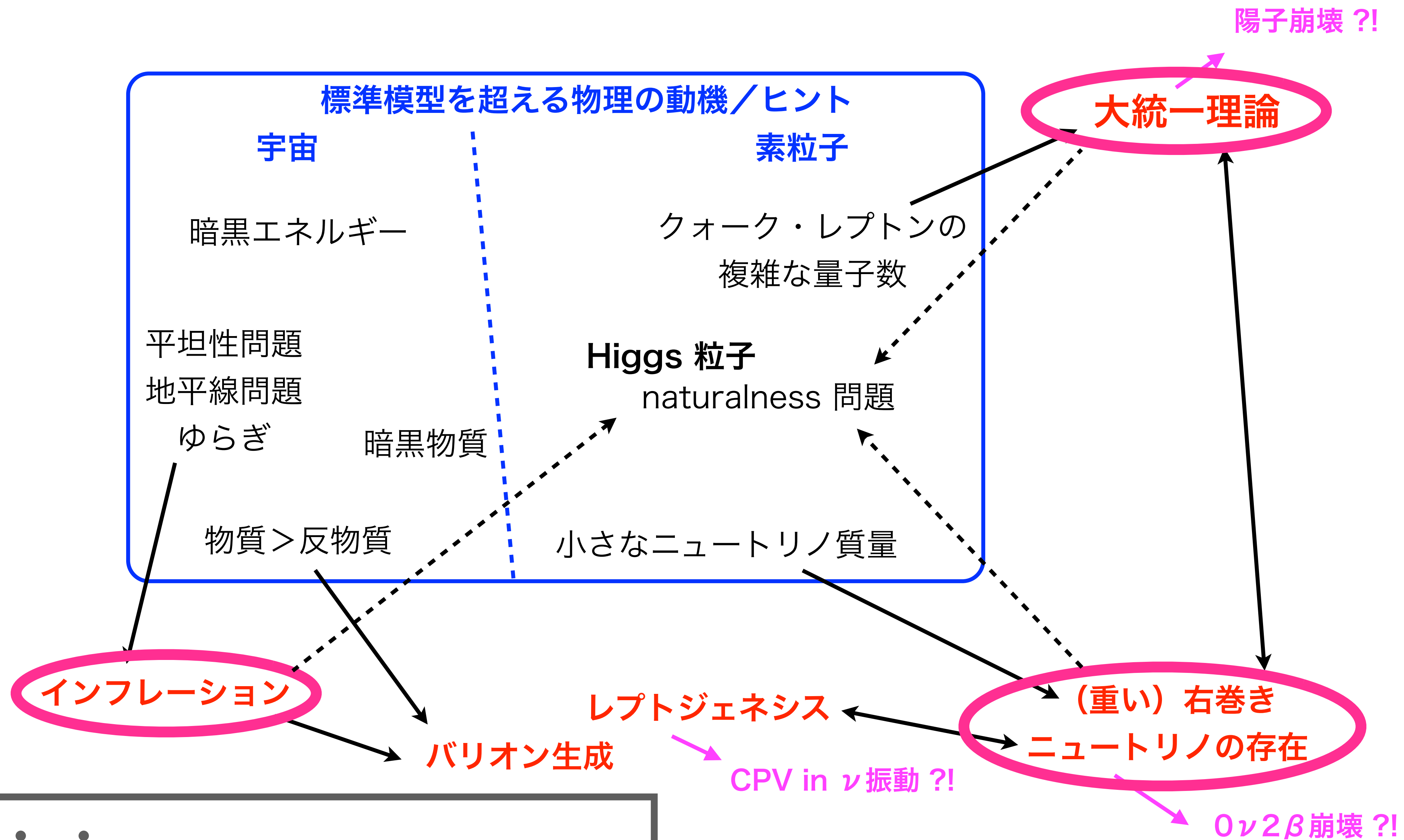


右巻きニュートリノ



右巻きニュートリノ





次は . . .

Higgsに関する理論的な問題

ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

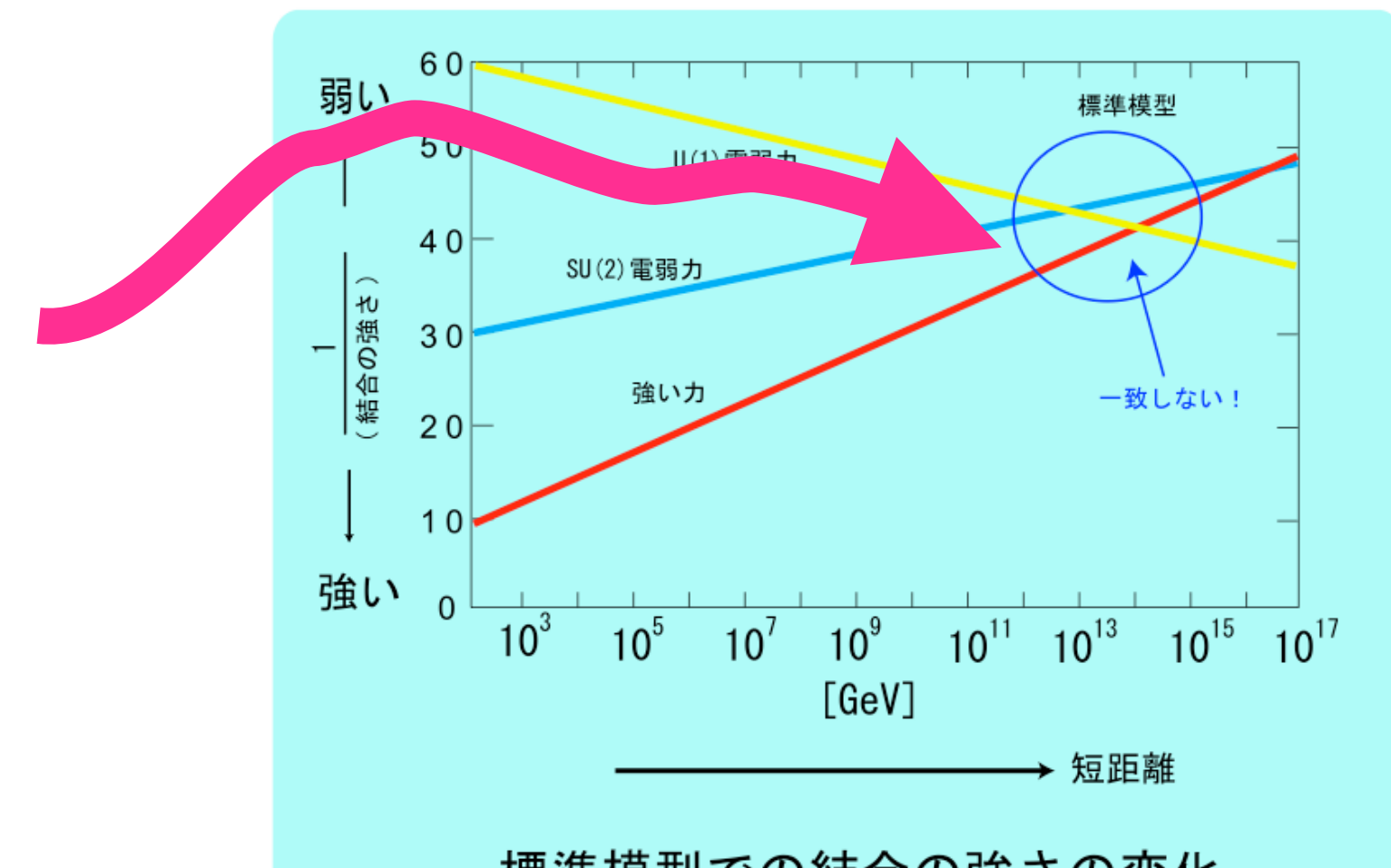
①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質＞反物質を説明するには N_1 の質量 $> 10^9$ GeV が必要。

(KH, Murayama, Yanagida,'01 + Davidson, Ibarra,'02：ただし最もシンプルなシナリオの場合)

②：大統一理論

大統一スケール = $10^{14} \sim 10^{16}$ GeV



③：インフレーション

・・・やはり高いスケールを要求。

例えば比較的シンプルなインフレーションモデルでは

$$\text{インフラトンスケール} \sim \text{プランクスケール} \times \frac{\delta T}{T} \sim 10^{13} \text{ GeV}$$

($\sim 10^{18}$ GeV) (温度ゆらぎ $\sim 10^{-5}$)

ヒッグス粒子の質量は約100 GeV。一方・・・

①：重い右巻きニュートリノ

宇宙の物質＞反物質を説明するには N_1 の質量 $> 10^9$ GeV が必要。

(KH, Murayama, Yanagida, '01 + Davidson, Ibarra, '02：ただし最もシンプルなシナリオの場合)

→ 少なくとも 10^9 GeV までは場の量子論で記述されているだろう。

すると・・・

謎 ヒッグス場に対する量子効果

naturalness problem

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + \Lambda^2 \quad (\Lambda \gg m_H)$$



(fine tuning like $1.000000000000000001 - 1$)

この謎の解の最有力候補が・・・

超対称性 ボゾンとフェルミオンを入れ替える対称性

Supersymmetry (SUSY)

quarks q	$\frac{1}{2}$	$\xleftrightarrow{\text{spin}}$	0	squarks $\tilde{q}$
leptons ℓ	$\frac{1}{2}$	$\xleftrightarrow{\hspace{1cm}}$	0	sleptons $\tilde{\ell}$
gauge bosons A_μ	1	$\xleftrightarrow{\hspace{1cm}}$	$\frac{1}{2}$	gauginos λ
Higgs bosons H	0	$\xleftrightarrow{\hspace{1cm}}$	$\frac{1}{2}$	higgsinos $\tilde{h}$

超対称性理論では

謎 ヒッグス場に対する量子効果

naturalness problem

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + \Lambda^2 \quad (\Lambda \gg m_H)$$

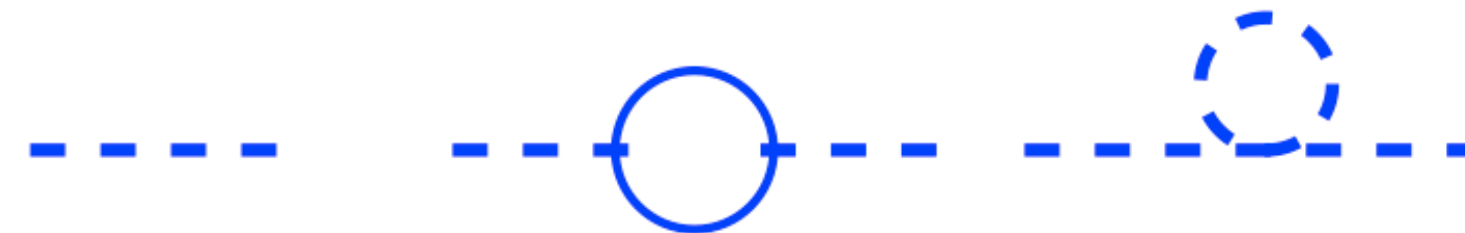


(fine tuning like 1.000000000000000001 - 1)

超対称性なし

→ solved by the supersymmetry !

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + (\Lambda^2 - \Lambda^2)$$



フェルミオン

ボゾン

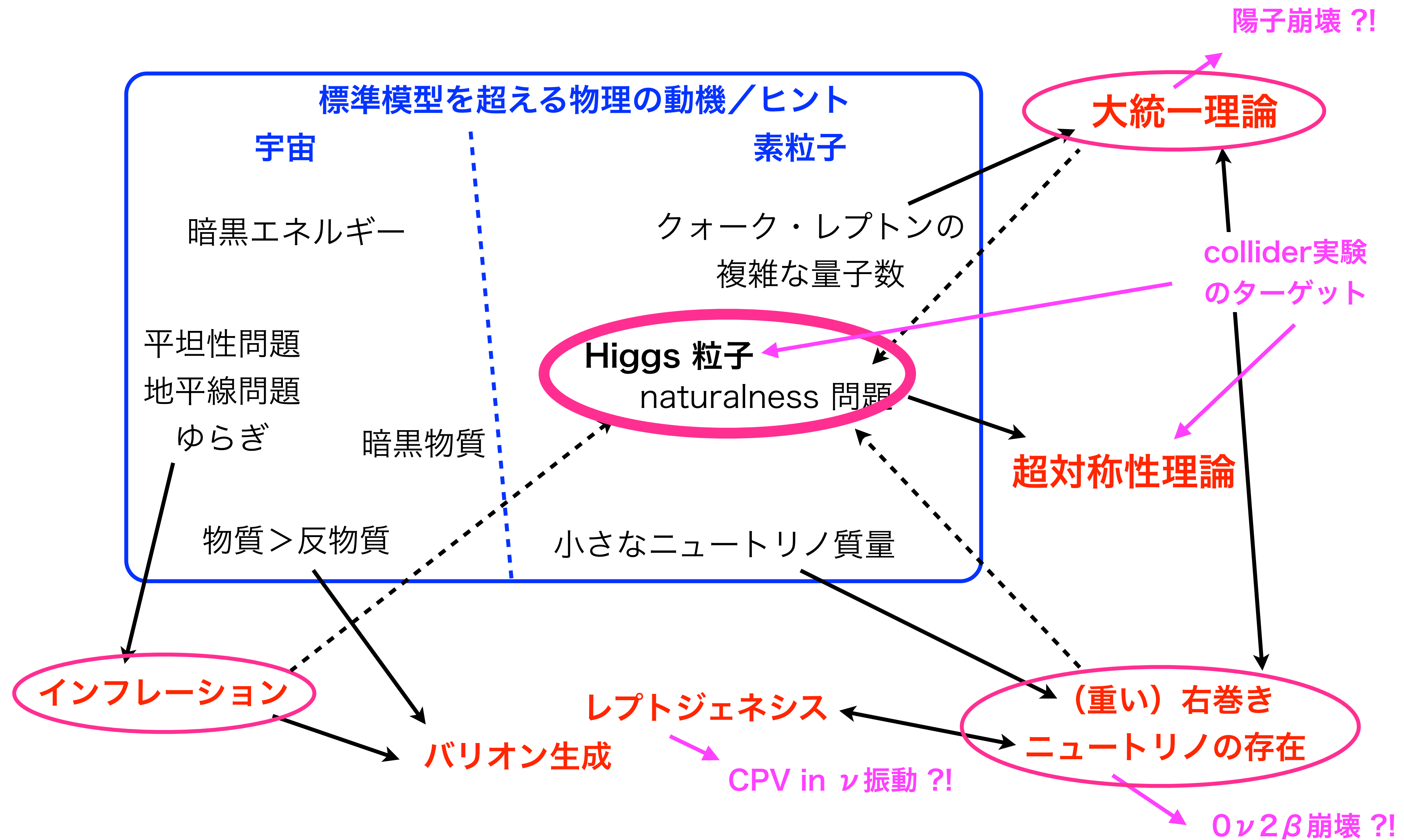
超対称性あり
問題解決！

fine tuning をほとんどなくするためには・・・

SUSY 粒子 < O(TeV)

→ LHC での発見に期待していたが、、、。

(SUSYは幻想だったのか？重くて見えないのか？巧妙に隠れているのか？・・・???)



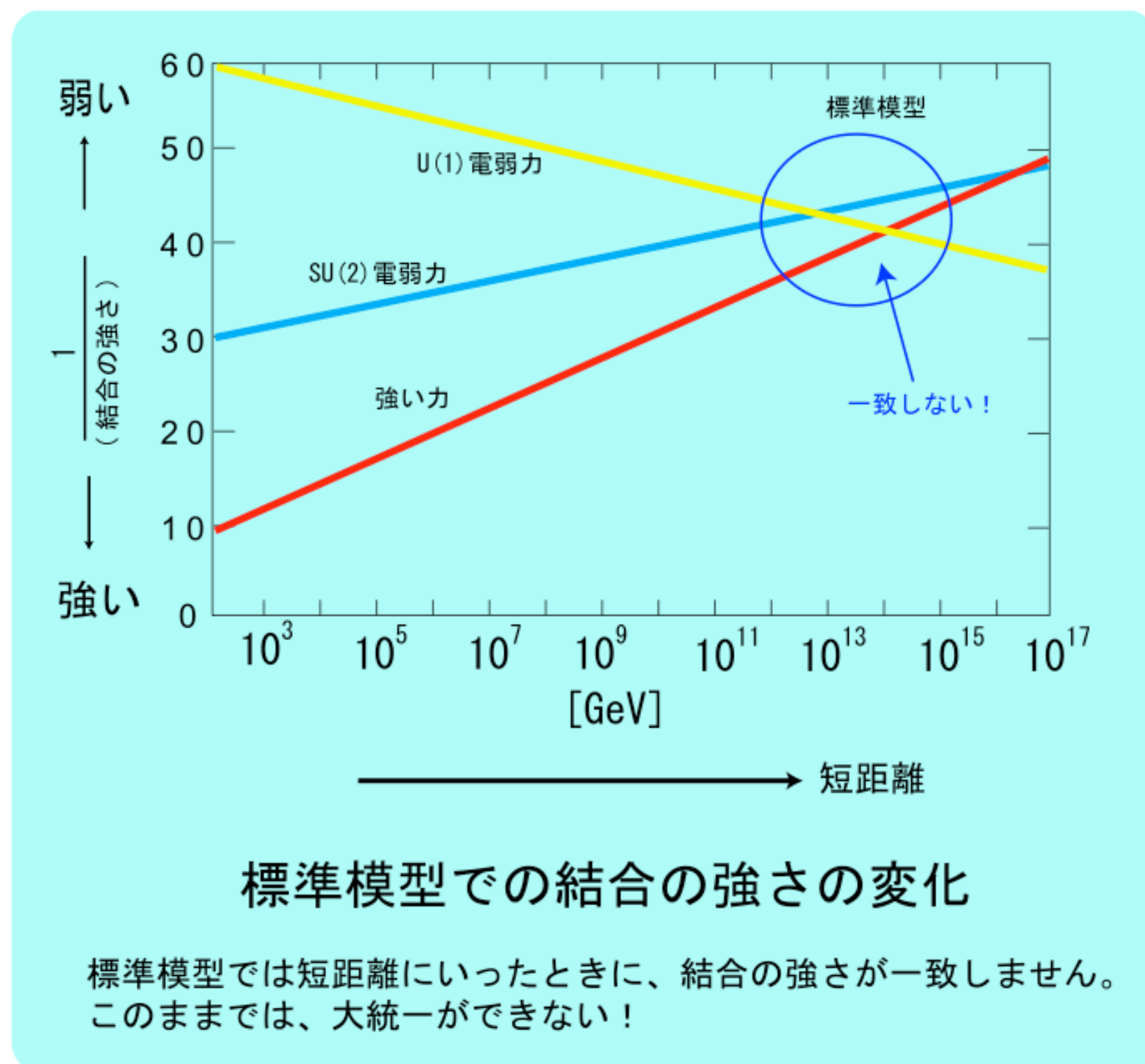
さらに・・・

大統一理論の予言：

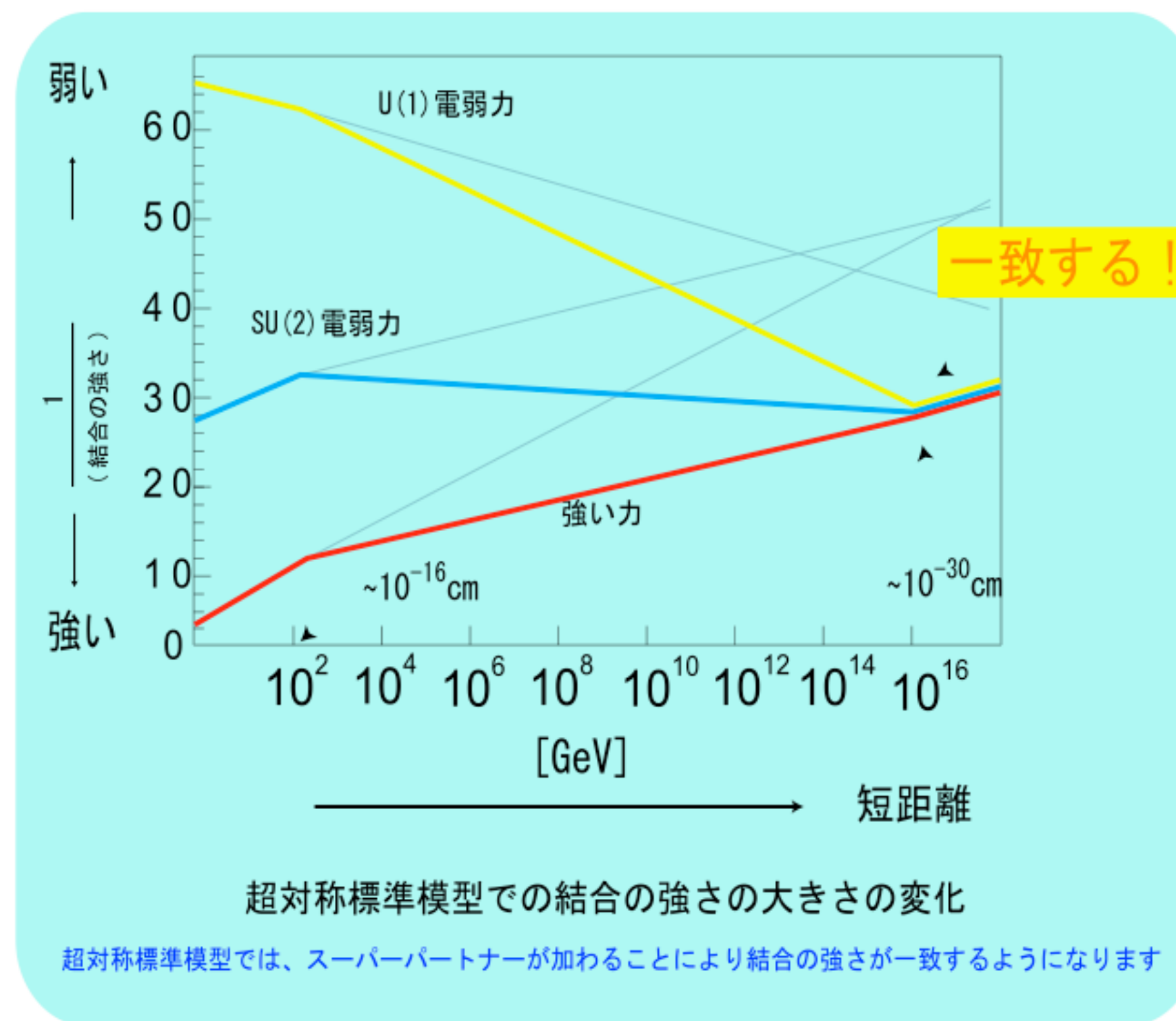
もし「大統一理論」が正しい理論なら・・・

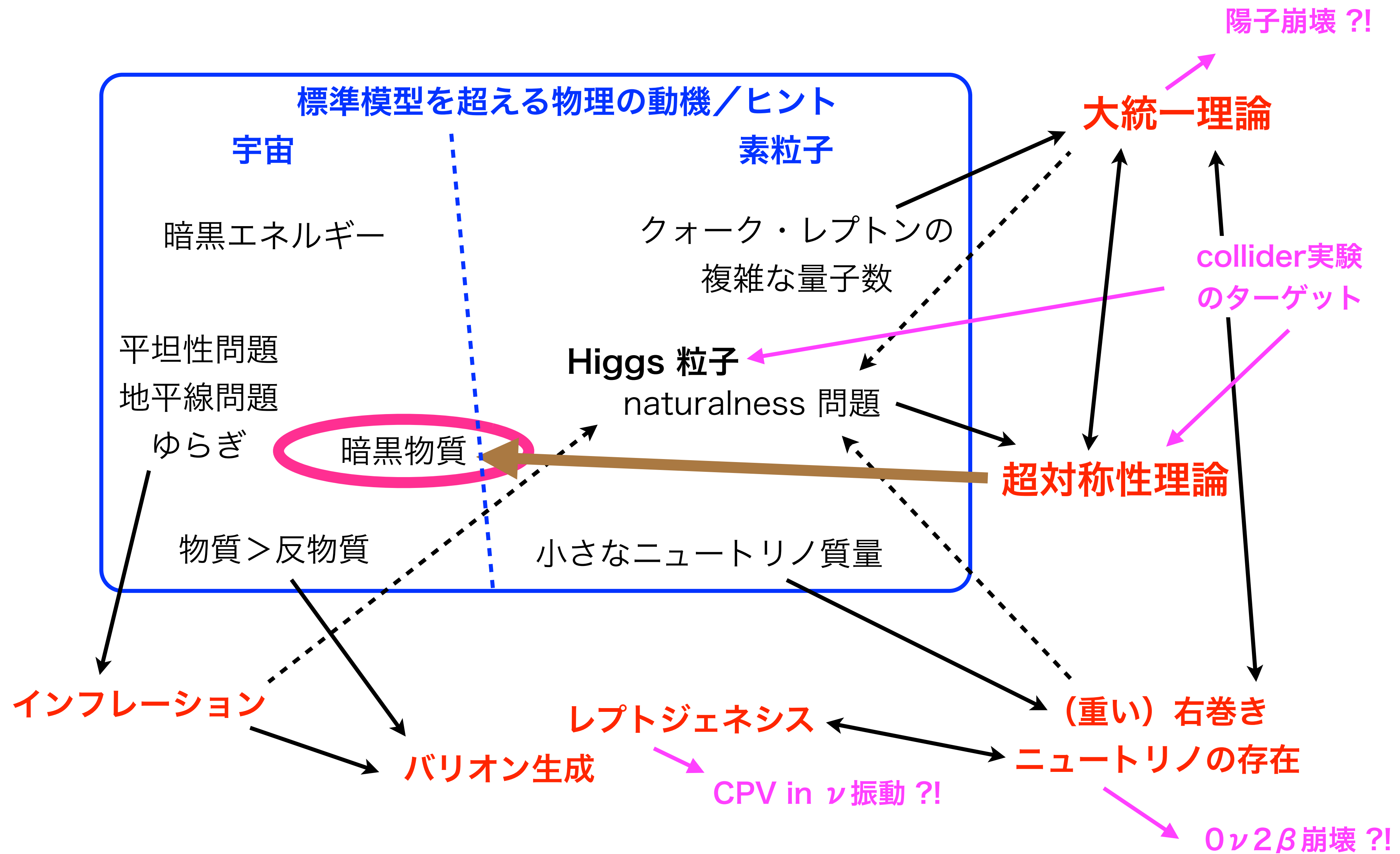
非常に短距離（＝非常に高いエネルギー）で3つの結合定数が一致するはず。

標準模型



標準模型 + SUSY

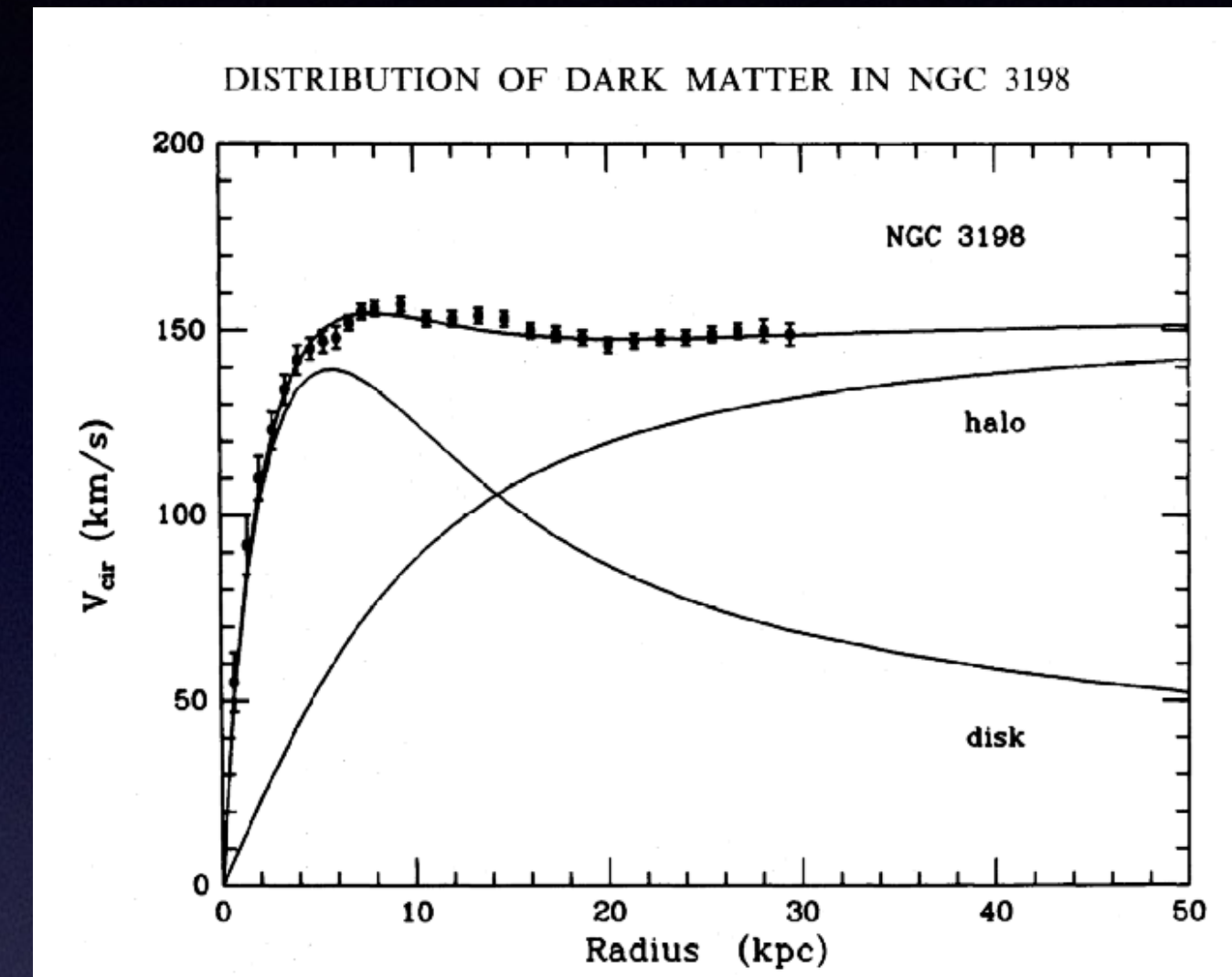




暗黒物質：重力でしか見えない物質

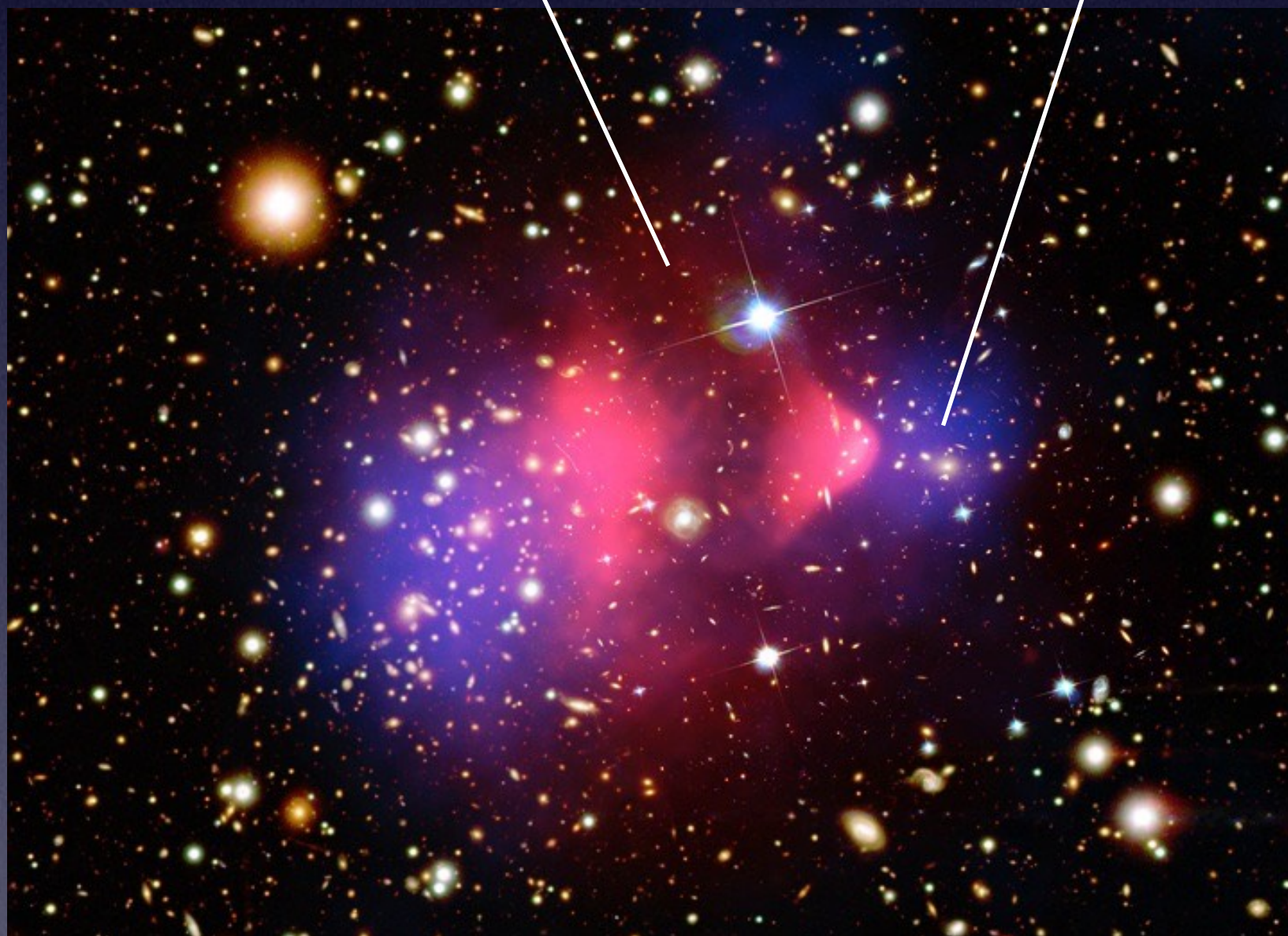
正体は分からないけど、
存在するという証拠は
沢山ある・・・。

- ・ 銀河の回転速度
- ・ 宇宙背景放射の非等方性の精密測定
- ・ 宇宙の構造形成
- ・ . . .



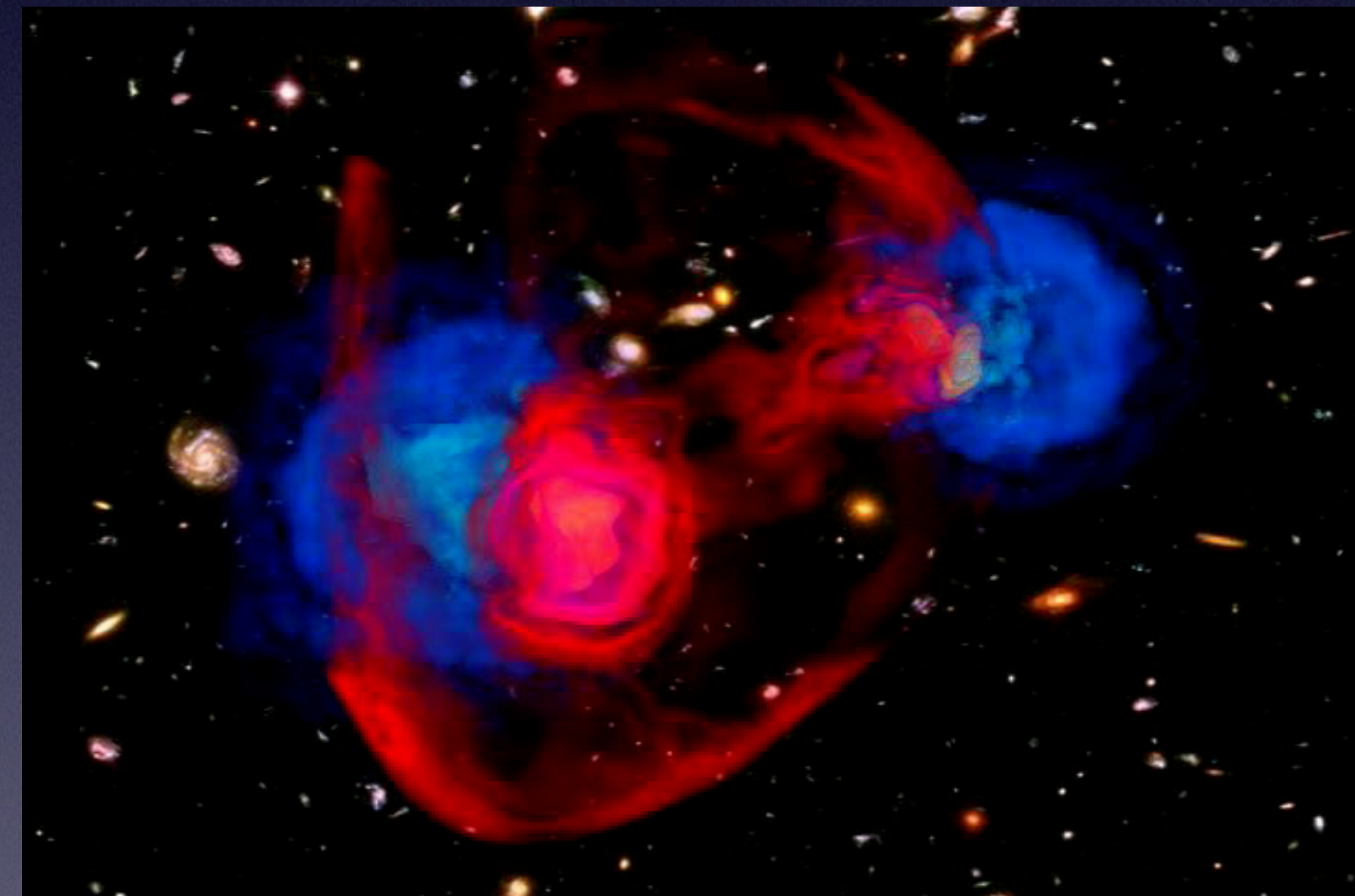
暗黒物質：重力でしか見えない物質

X線で見た像
(ふつうの物質)



Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

重力レンズで見た像
(暗黒物質)



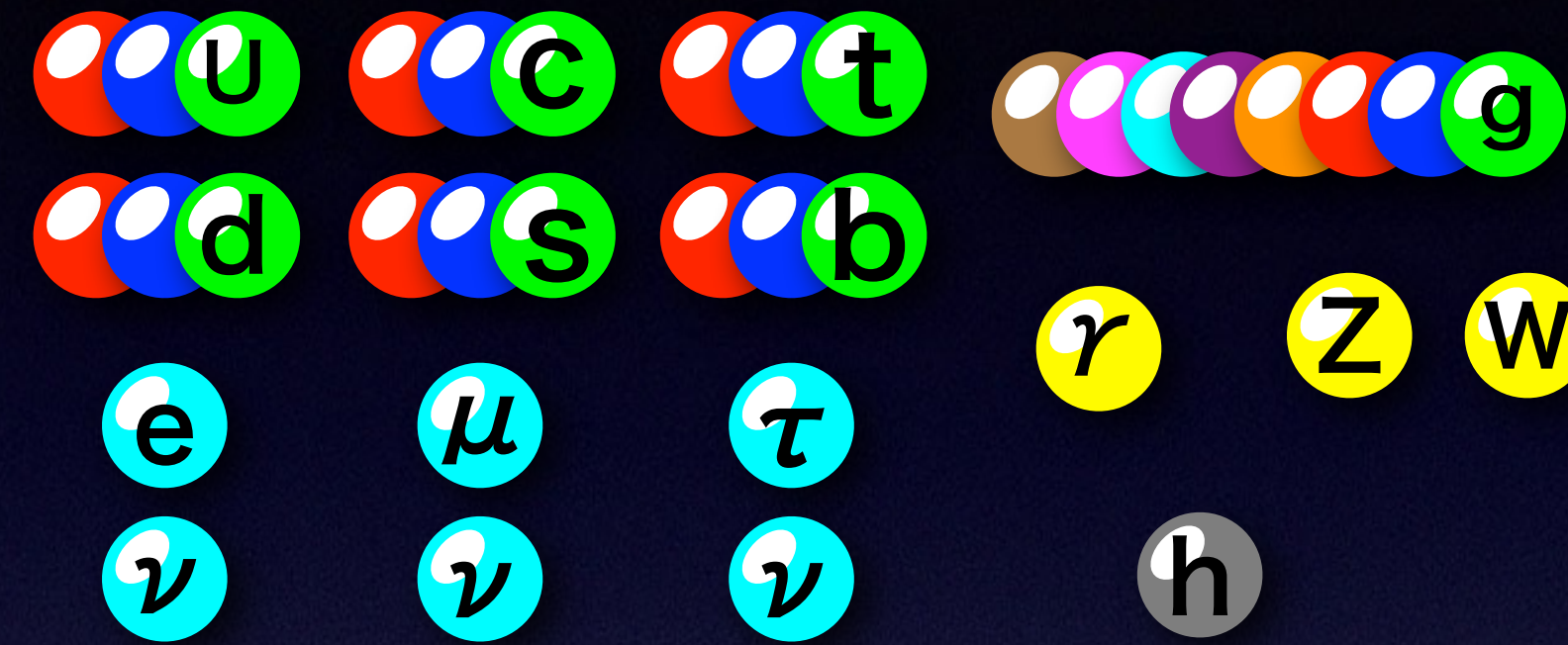
Credit: J.Wise, M. Bradac (Stanford/KIPAC)

<http://www.slac.stanford.edu/~jwise/research/movies/HiResBullet.mov>

暗黒物質の正体

標準模型を超える素粒子理論が必要！

標準模型

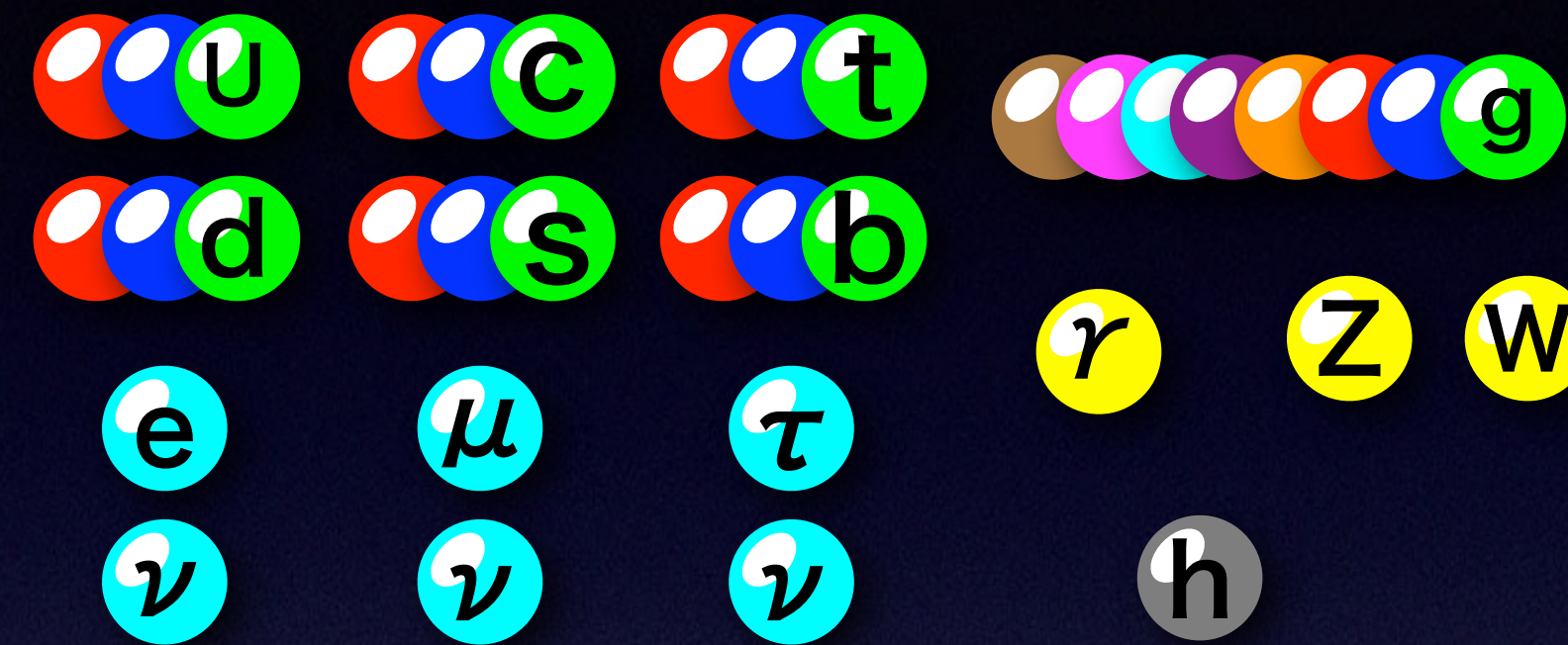


標準模型の中には暗黒物質になれる
粒子はない！！

暗黒物質の正体

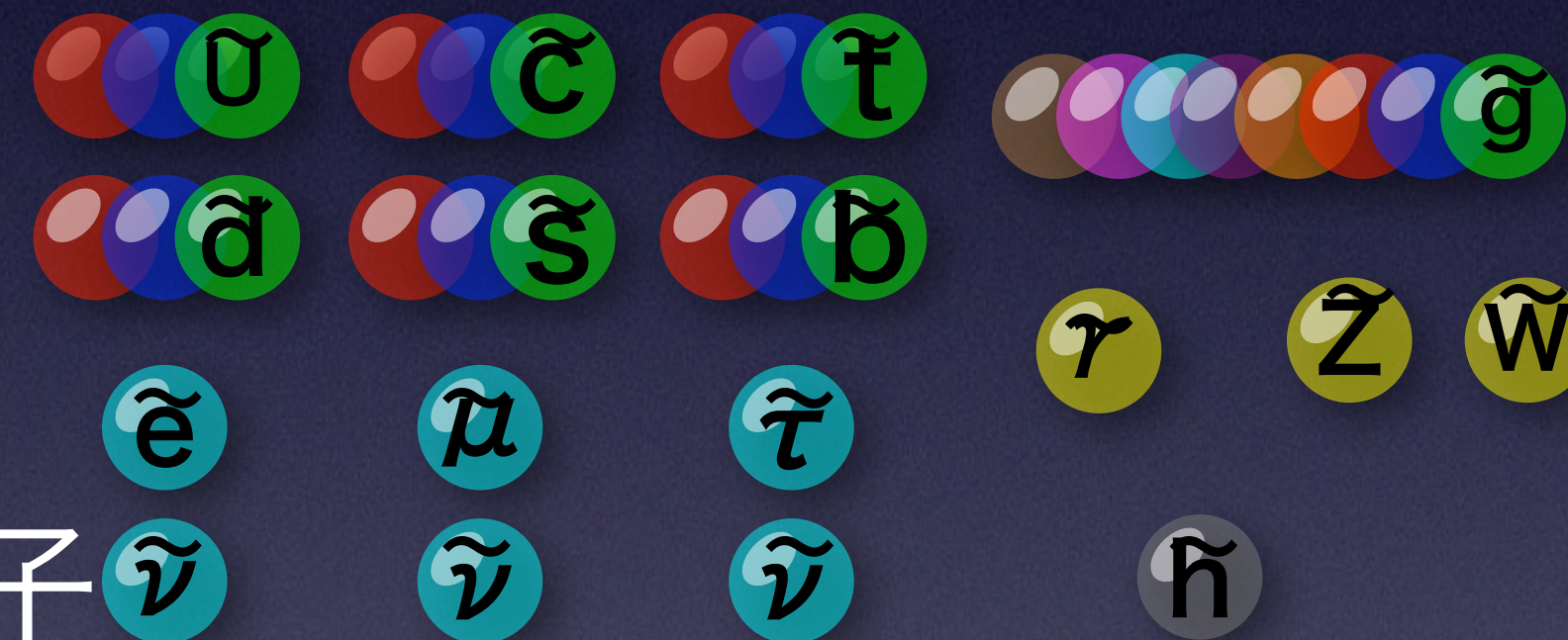
標準模型を超える素粒子理論が必要！

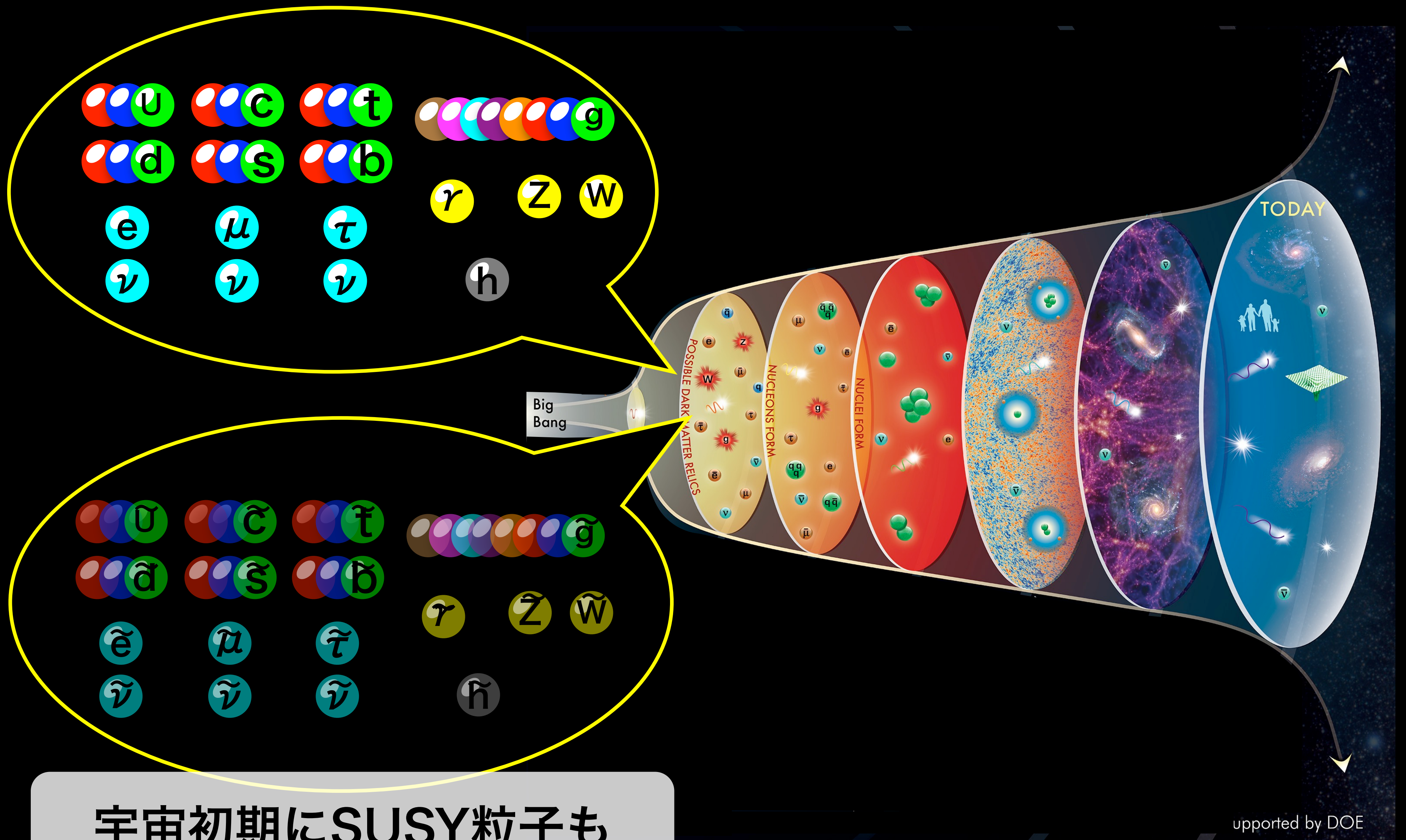
標準模型

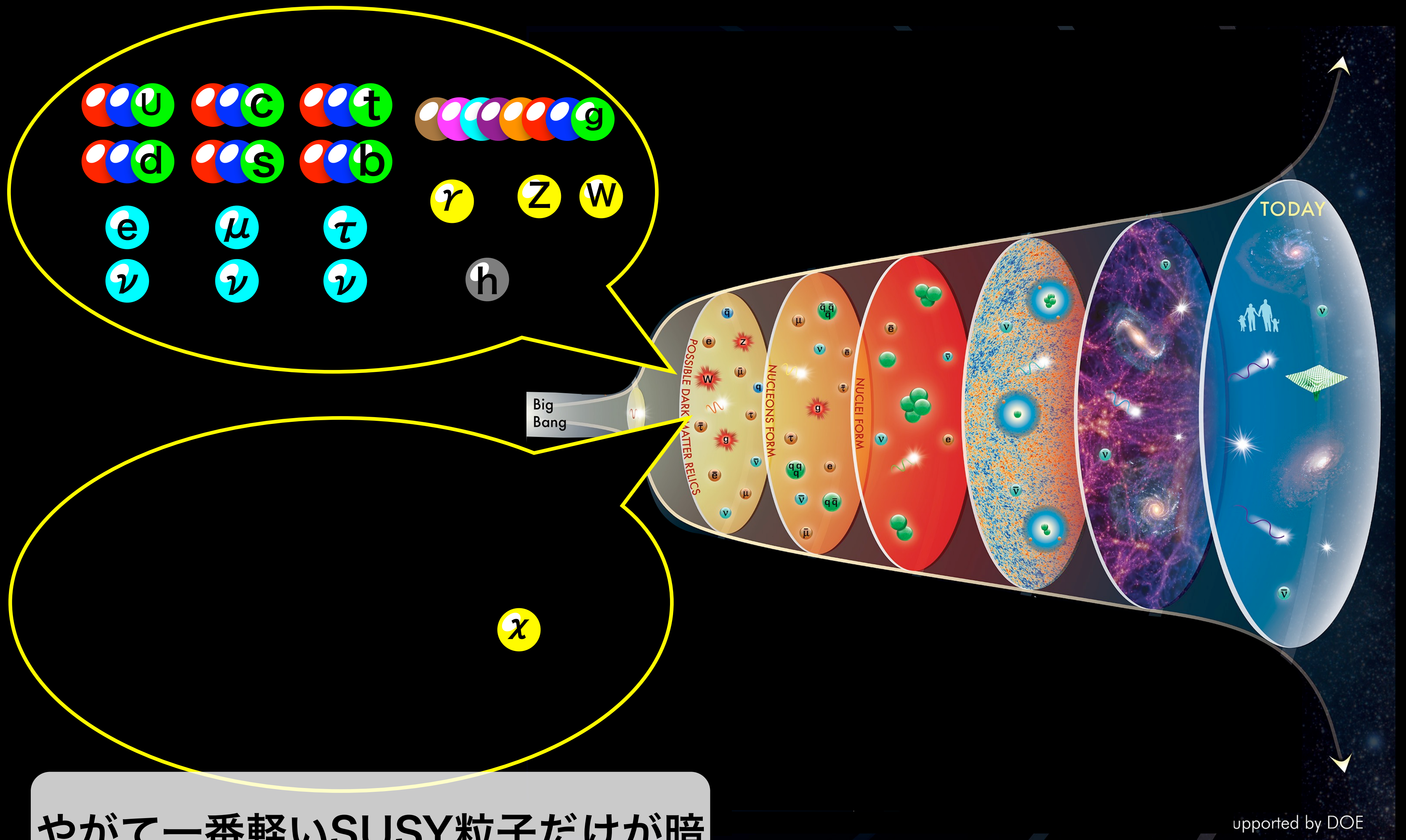


超対称性

SUSY粒子



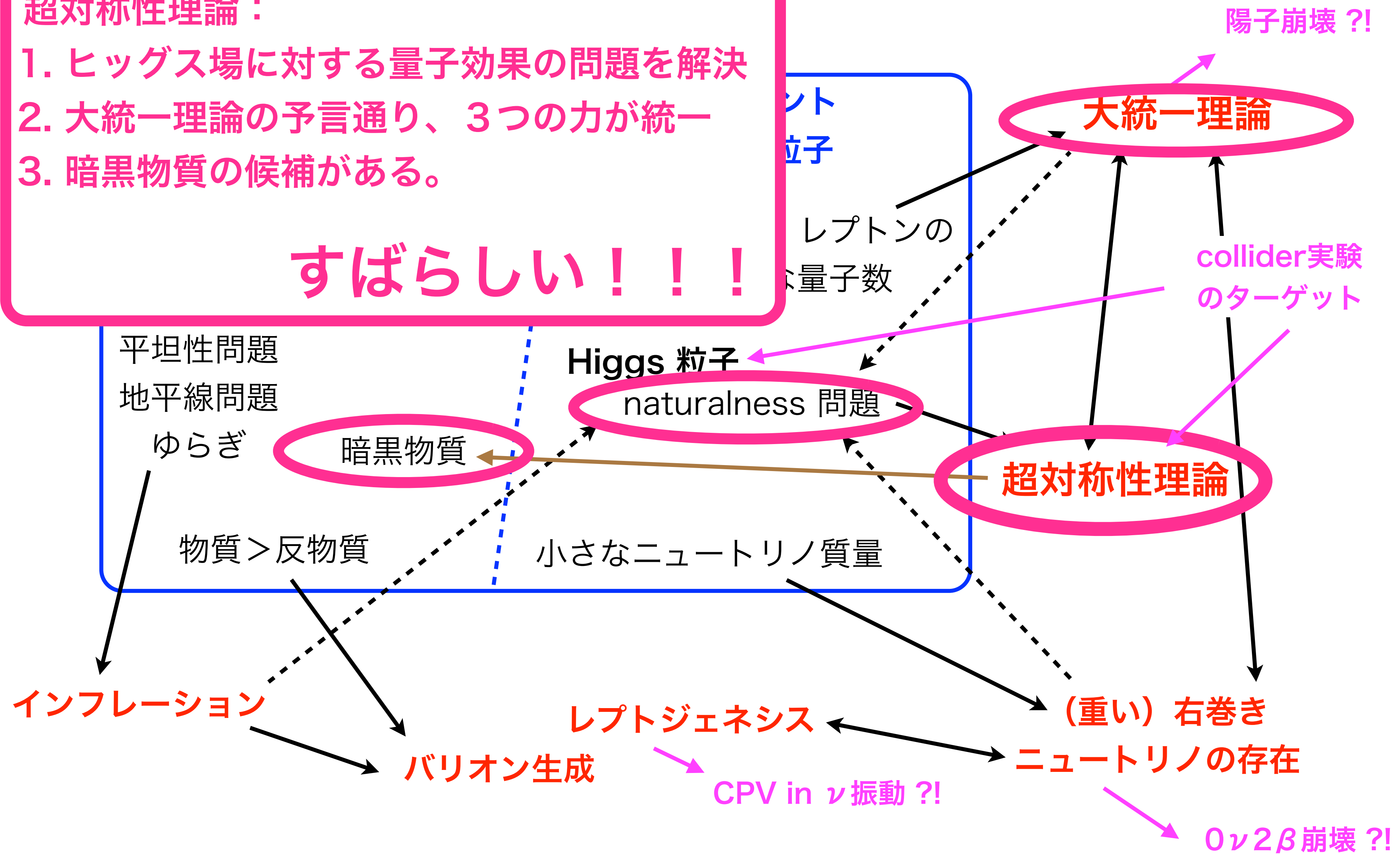


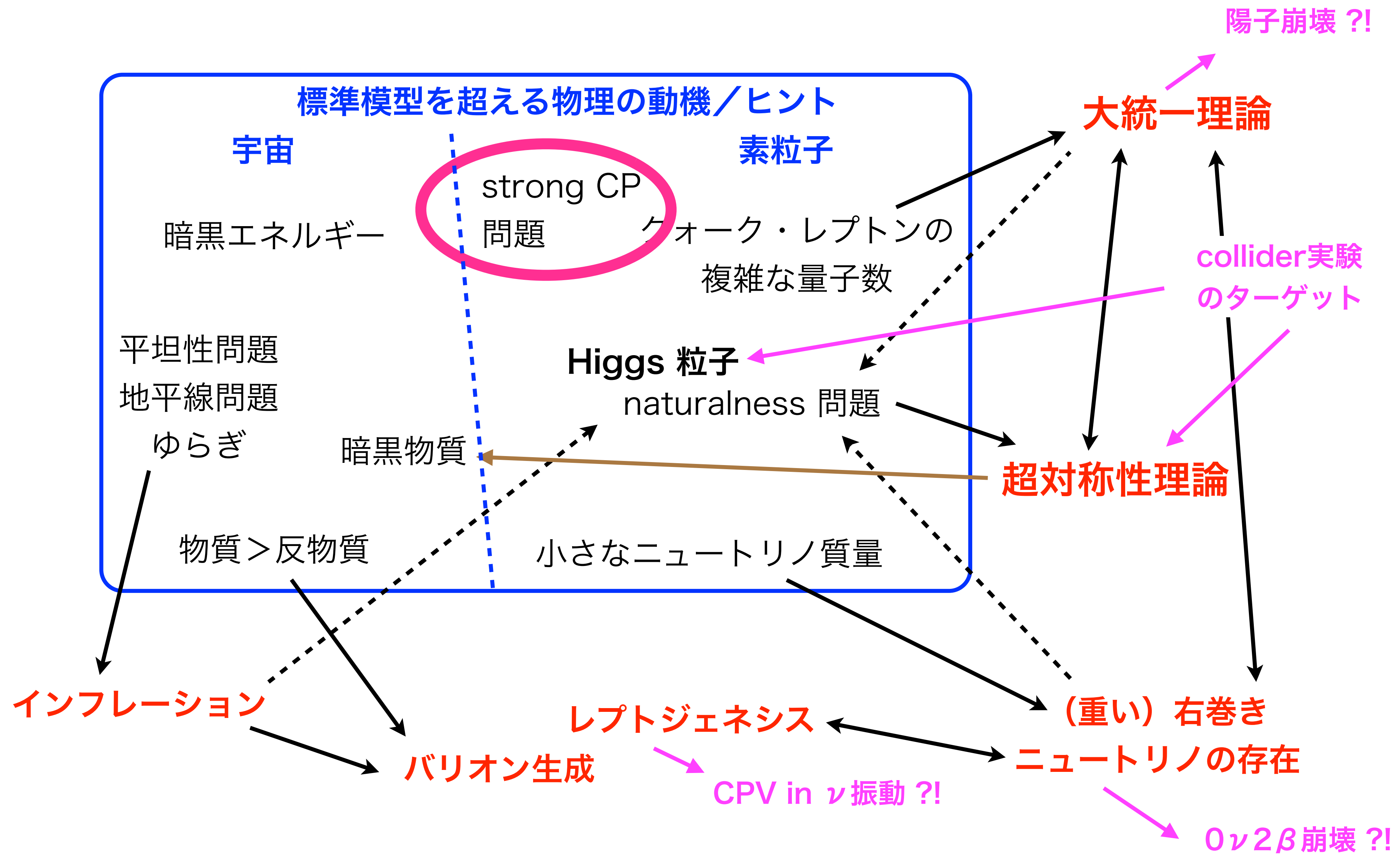


超対称性理論：

1. ヒッグス場に対する量子効果の問題を解決
2. 大統一理論の予言通り、3つの力が統一
3. 暗黒物質の候補がある。

すばらしい！！！！





アクシオン

- Strong CP 問題

$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}, \quad \bar{\theta} = \theta + \arg \det m_q$$

$$\underline{|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10}} \text{ from neutron EDM} \text{ Why?}$$

アクシオン

- Strong CP 問題

$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}, \quad \bar{\theta} = \theta + \arg \det m_q$$

$$|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10} \text{ from neutron EDM}$$

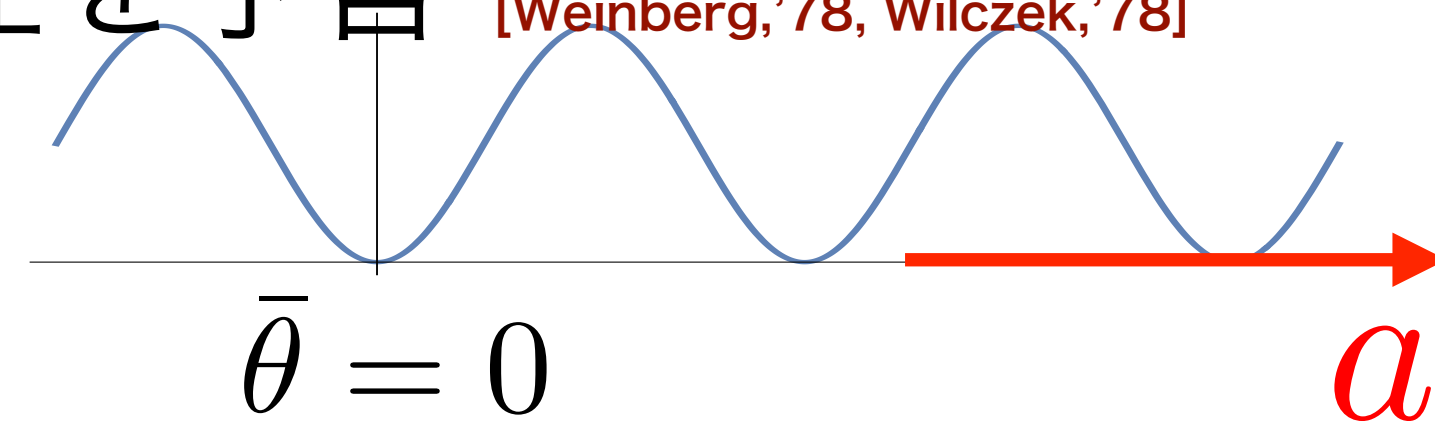
Why?

- Peccei-Quinn 機構で解決出来る。 [Peccei, Quinn,'77]

軽い粒子 **アクシオン** の存在を予言

[Weinberg,'78, Wilczek,'78]

$$\mathcal{L} = \frac{\alpha_s}{8\pi} \frac{a}{f_a} F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}$$



アクシオン

- Strong CP 問題

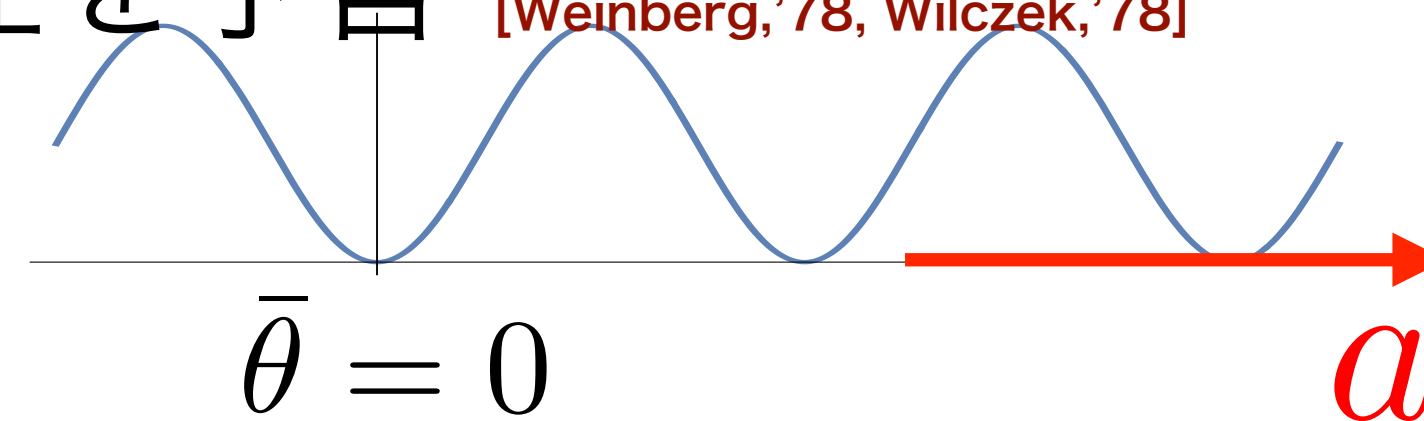
$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}, \quad \bar{\theta} = \theta + \arg \det m_q$$

$$|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10} \text{ from neutron EDM } \text{Why?}$$

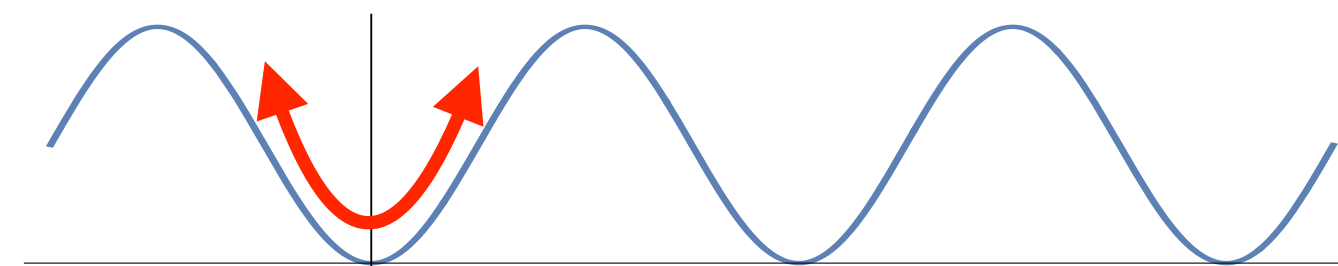
- Peccei-Quinn 機構で解決出来る。 [Peccei, Quinn,'77]

軽い粒子 **アクシオン** の存在を予言 [Weinberg,'78, Wilczek,'78]

$$\mathcal{L} = \frac{\alpha_s}{8\pi} \frac{a}{f_a} F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}$$

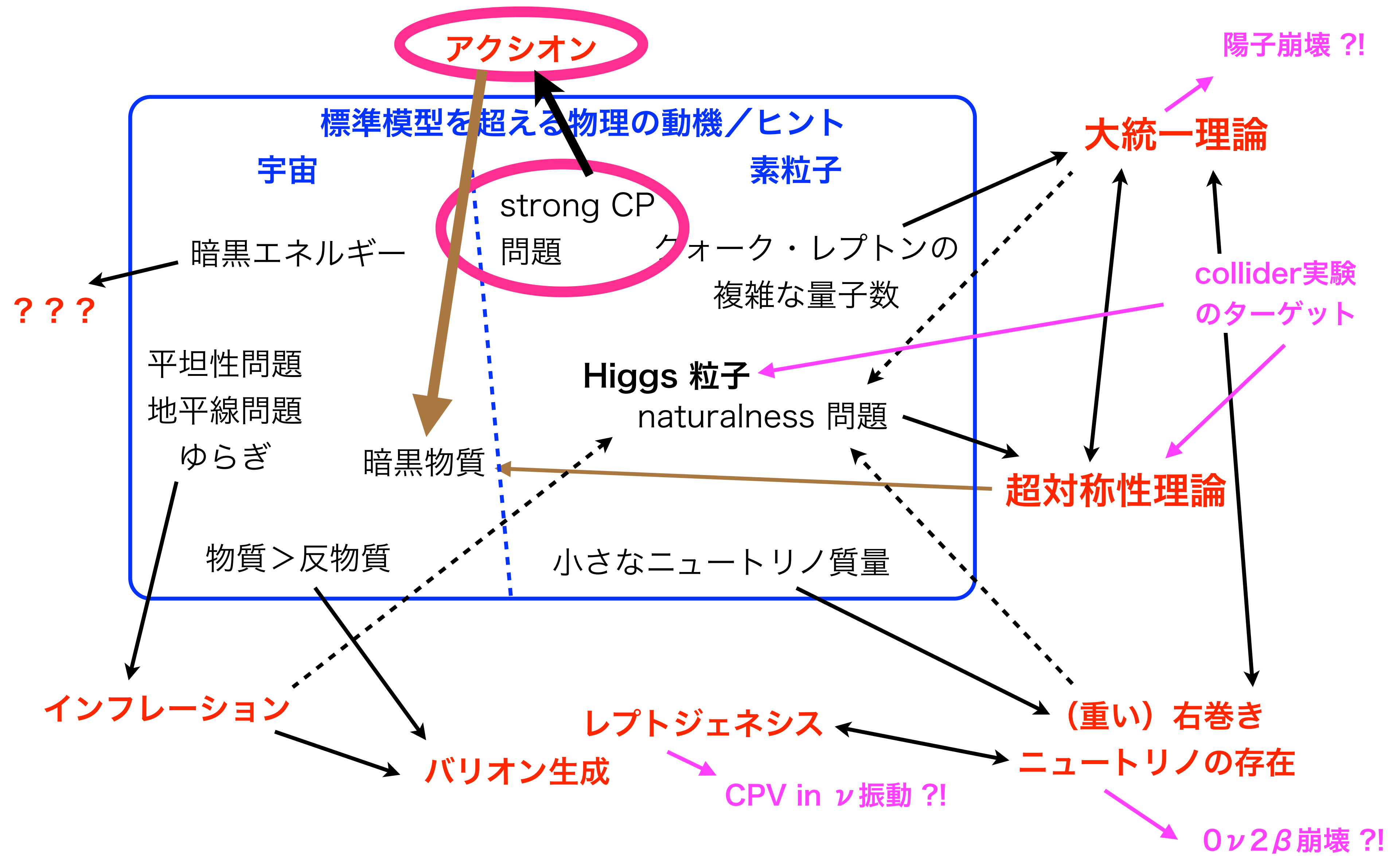


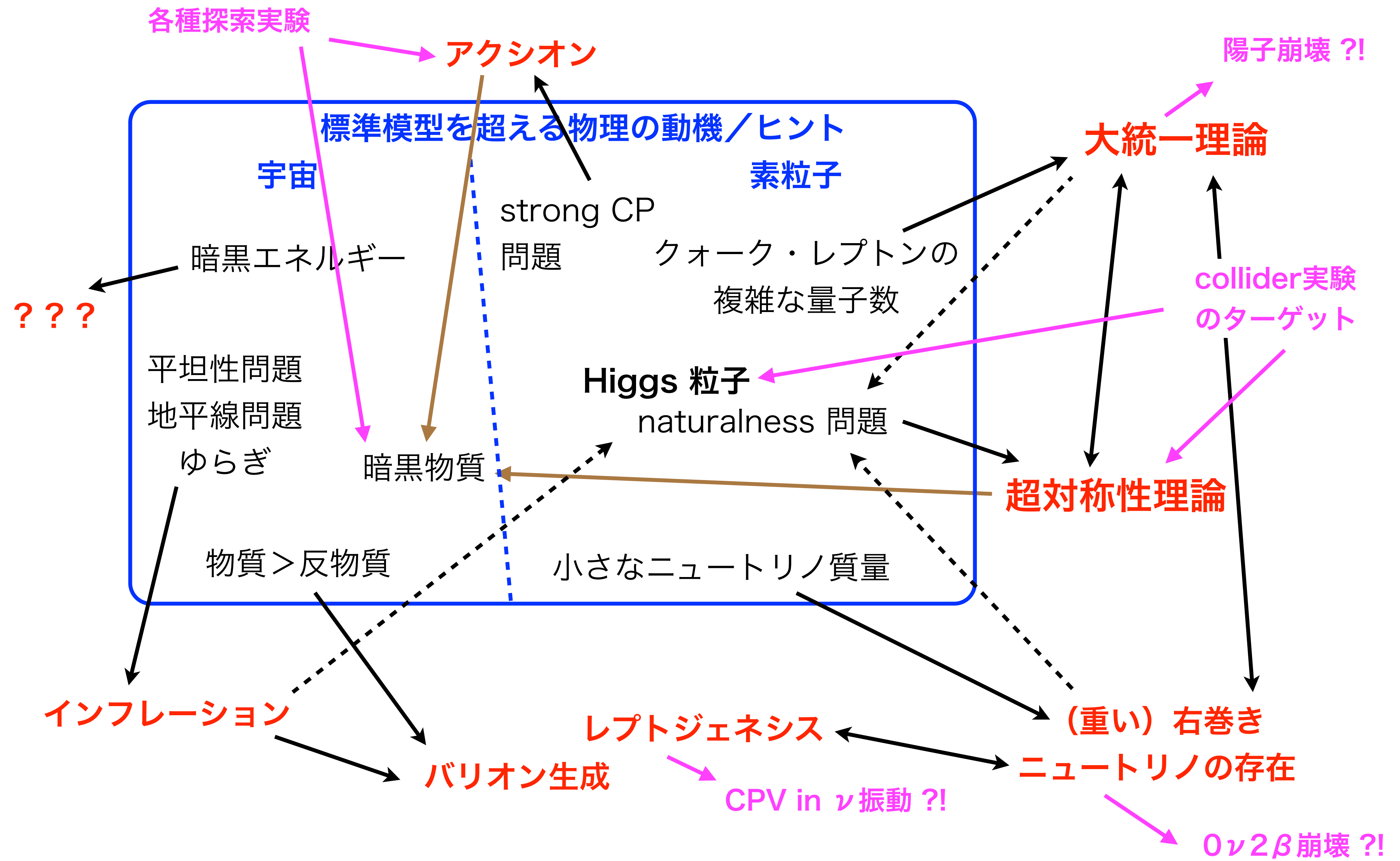
- アクシオン** も **暗黒物質** の候補！

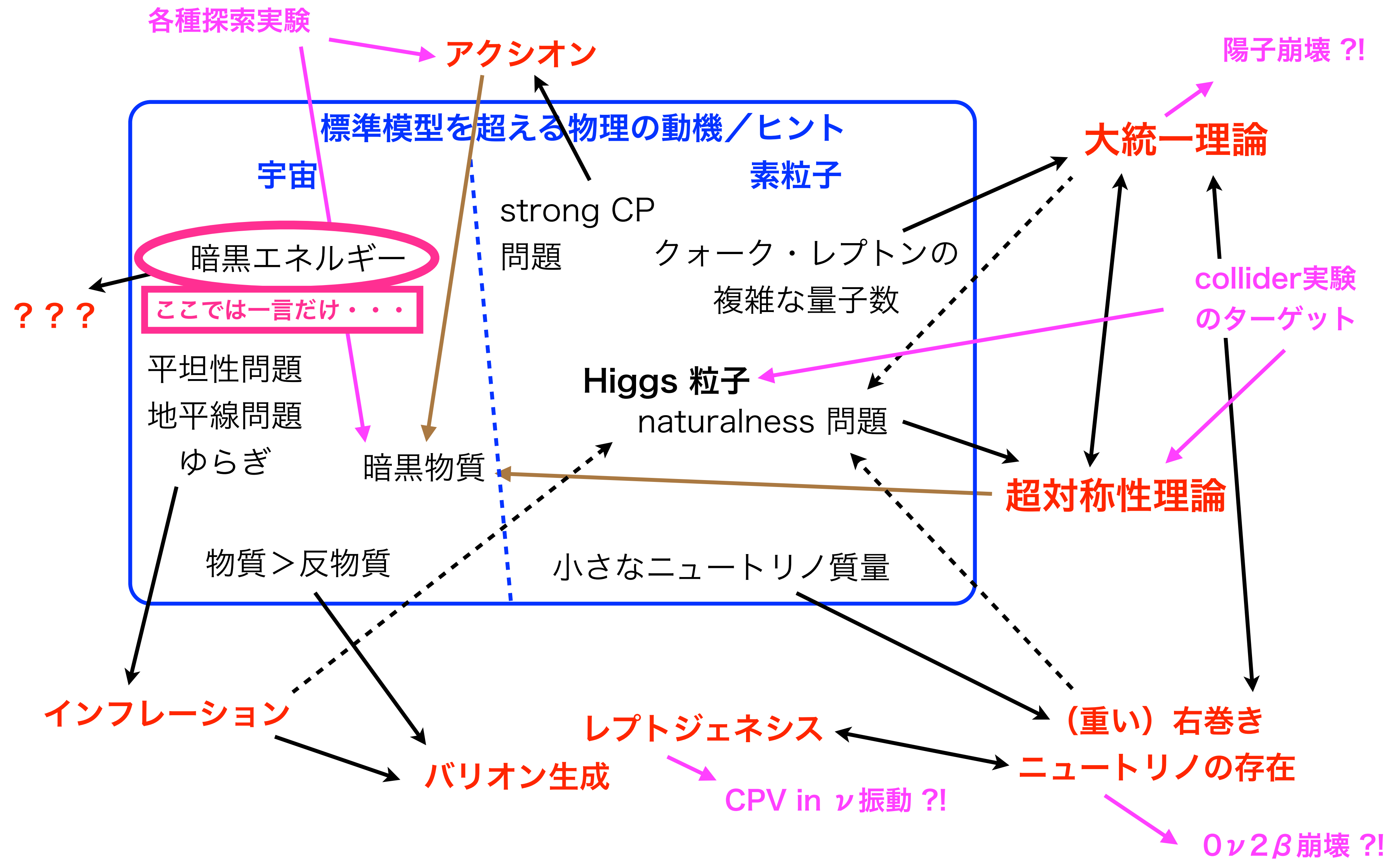


$$\Omega_a h^2 = 0.18 \theta_i^2 \left(\frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.19} .$$

[Turner,'86]

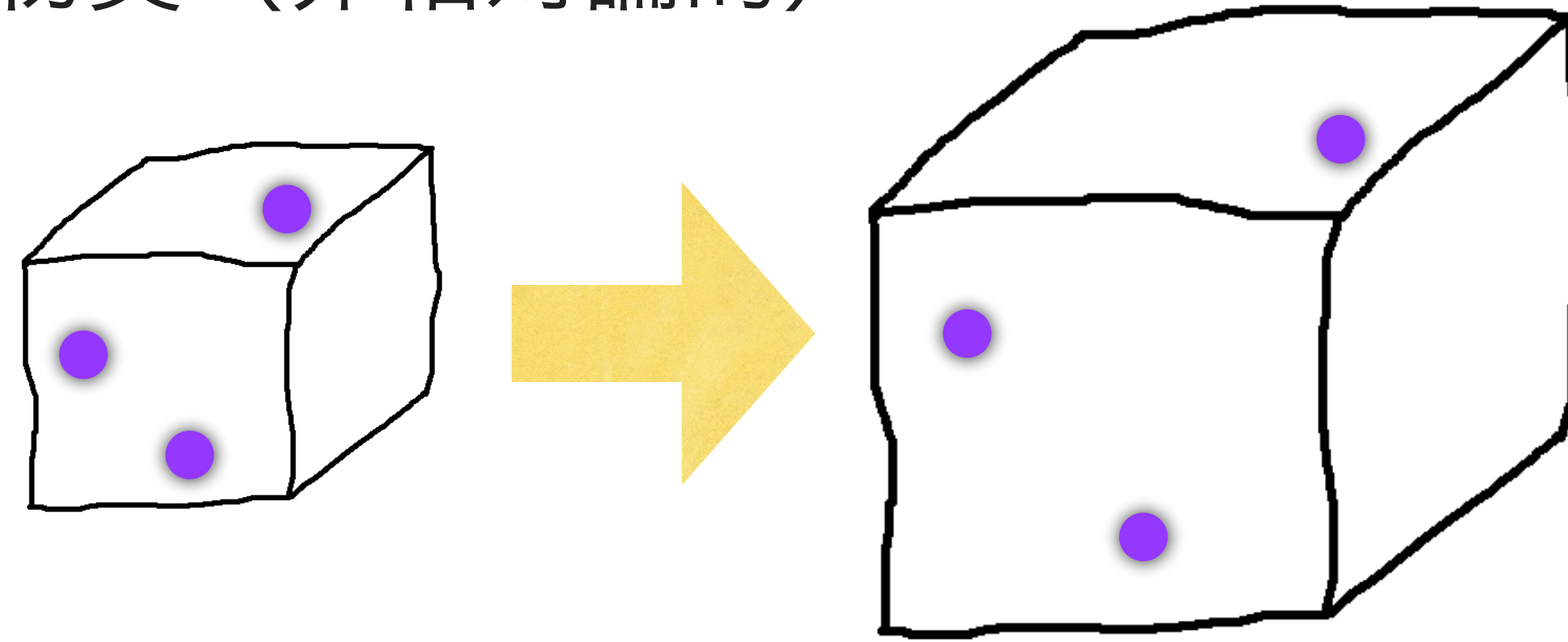






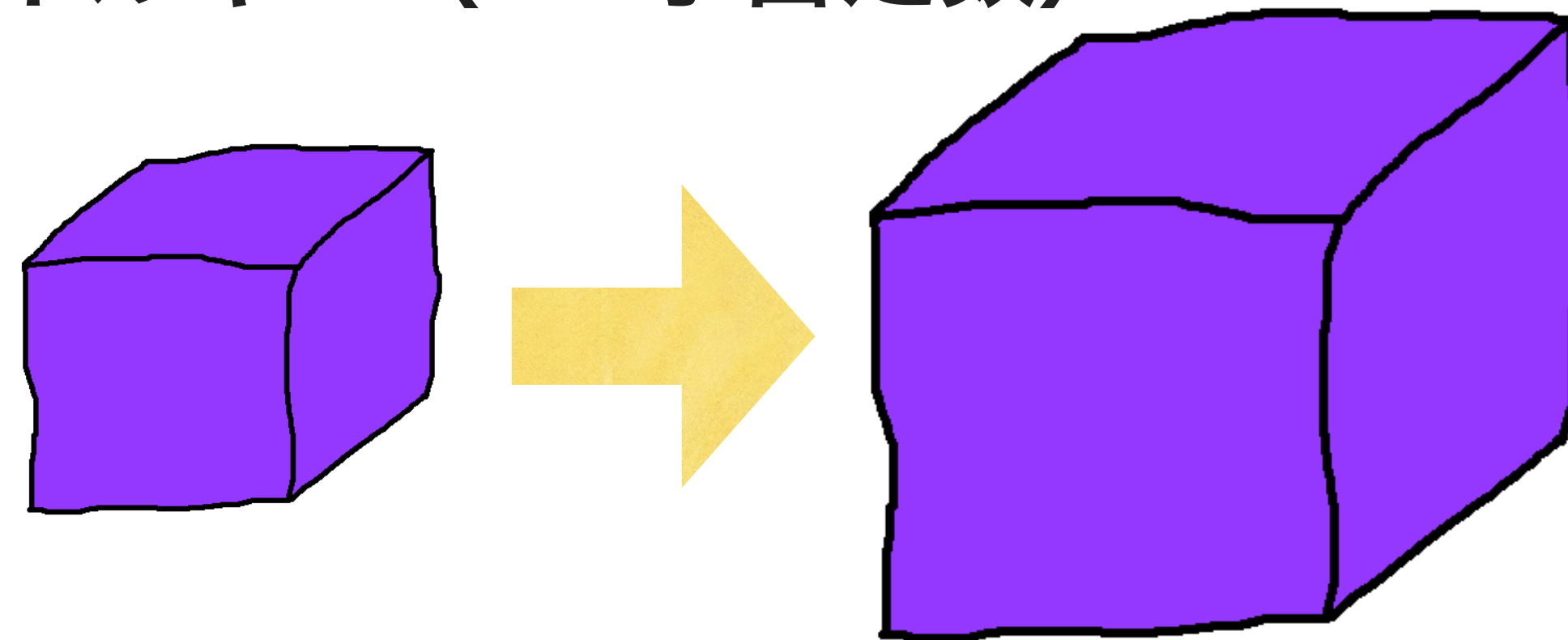
暗黒エネルギーの謎

普通の物質（非相対論的）



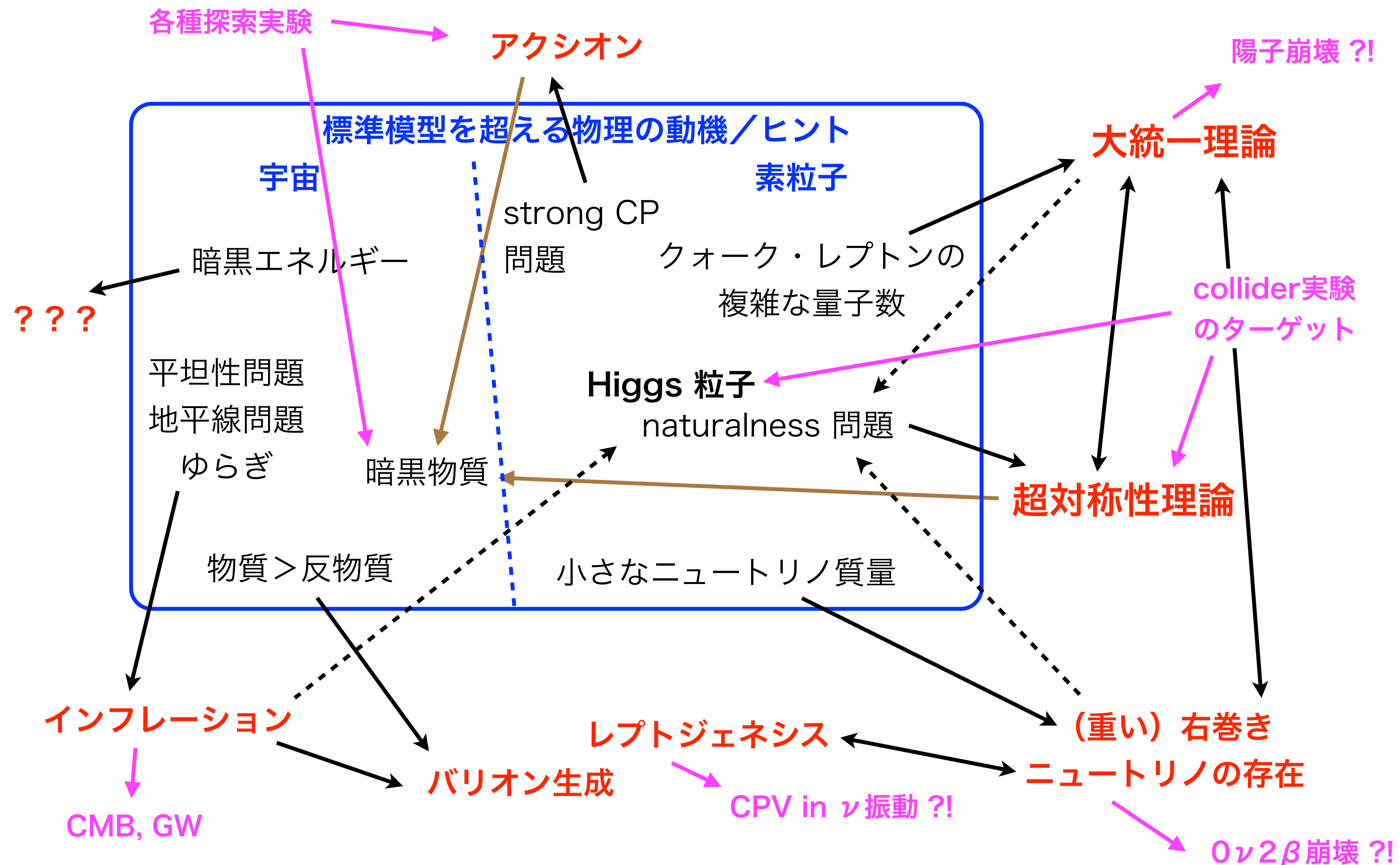
宇宙が膨張して体積が倍になったら密度は半分

暗黒エネルギー（ $\simeq$ 宇宙定数）

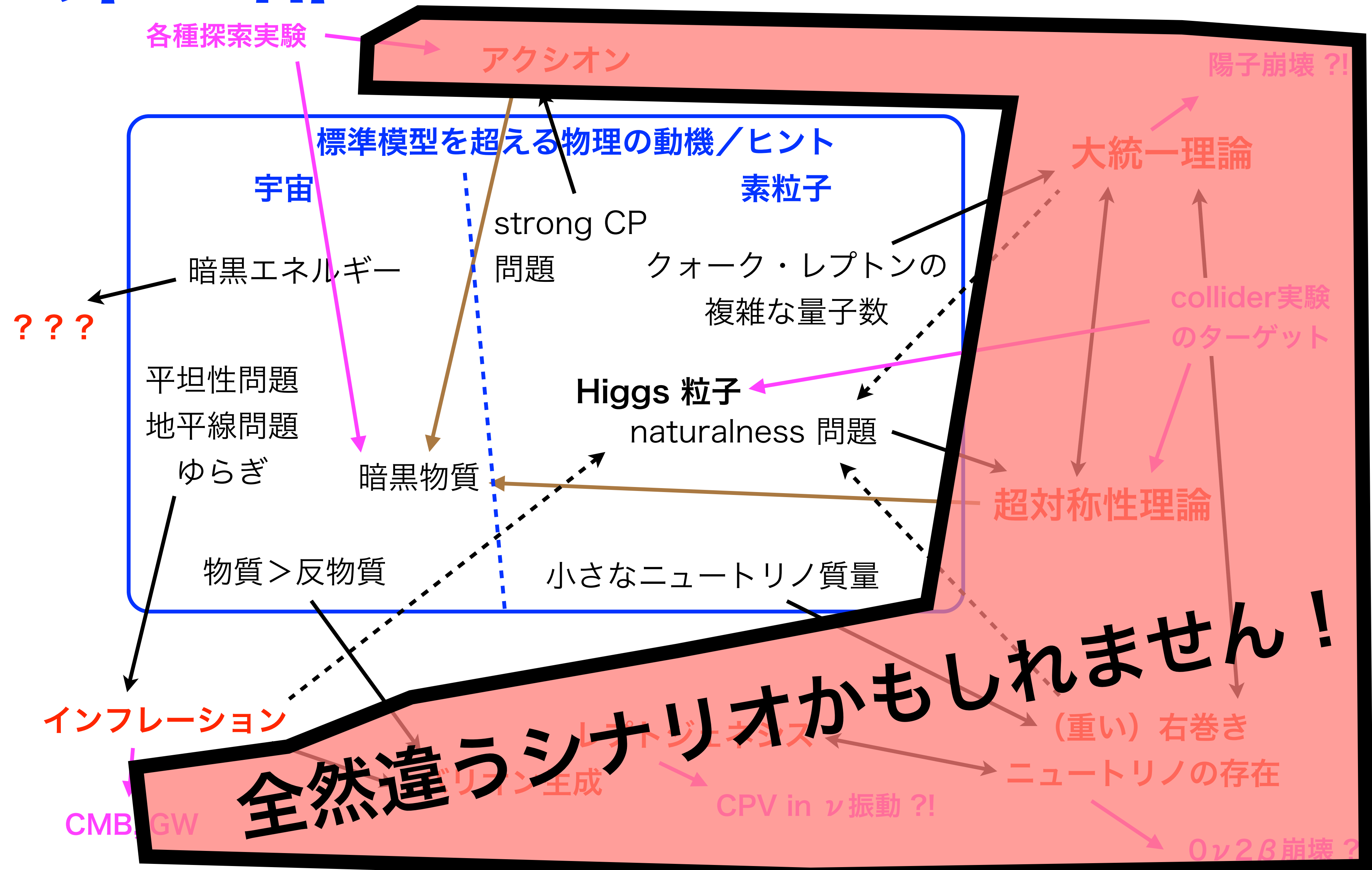


宇宙が膨張しても密度が一定

第1部まとめ



第1部まとめ



- ◆ 第1部おしまい。
- ◆ 以下では黒板を使って各論をやります